

Bakalářská práce

Optimalizace procesu spékání Optimization of the Sintering Process

Jméno autora: Samuel Dorociak

Rok odevzdání: 2021

Abstrakt

Hlavní myšlenkou této bakalářské práce je seznámení s technologickými procesy spékání, jeho ekologickými a ekonomickými následky. Zároveň popis a hodnocení chemických a technologických vlastností rudných surovin pro výrobu aglomerátu. Důležitou částí je charakteristika železné rudy použité pro výrobu aglomerátu, jeho fyzikálně-chemických, mineralogických a metalurgických vlastností. Určení těchto vlastností je důležité pro výrobu aglomerátu vysoké kvality. Kvalita železné rudy je určena obsahem jednotlivých přítomných prvků, zejména se jedná o obsah železa.

Klíčová slova

Vysoká pec, aglomerát, spékání, železná ruda, surové železo, emise, biomasa

Abstract

The main idea of this bachelor thesis is to learn about the technological processes of sintering, its ecological and economic consequences. At the same time, a description and evaluation of the chemical and technological properties of the ore raw materials to produce the agglomerate. An important part is the characteristics of the iron ore used to produce the agglomerate, its physic-chemical, mineralogical, and metallurgical properties. Determination of this characteristic is important to produce a high-quality agglomerate. The quality of iron ore is determined by the content of the individual elements present, primary the content iron.

Key words

Blast furnace, agglomerate, sintering, iron ore, pig iron, emission, biomass

Obsah

1.	Úvod	2
2.	Analýza literárních poznatků z oblasti spékání železorudných surovin.....	3
2.1.	Vysokopecní produkce	7
2.2.	Vstupní suroviny pro výrobu surového železa	8
2.3.	Aglomerace a aglomerát.....	10
2.4.	Emise při spékání a recyklace odpadního plynu	12
2.5.	Optimalizace vstupních surovin pro aglomeraci a možné náhrady paliva při výrobě aglomerátu	13
2.6.	Plynodynamická stránka procesu spékání	20
3.	Charakteristika procesu a požadavky na vlastnosti železnorudných surovin.....	24
3.1.	Chemické a fyzikální vlastnosti rudných surovin.....	26
4.	Analýza vybraných vlastností železorudných surovin pro podmínky ČR	29
4.1.	Železorudné suroviny a aditiva pro proces aglomerace	29
4.2.	Vybrané vlastnosti železorudných surovin.....	31
5.	Závěr.....	40
	Literatura	42
	Seznam obrázků.....	44
	Seznam tabulek.....	45

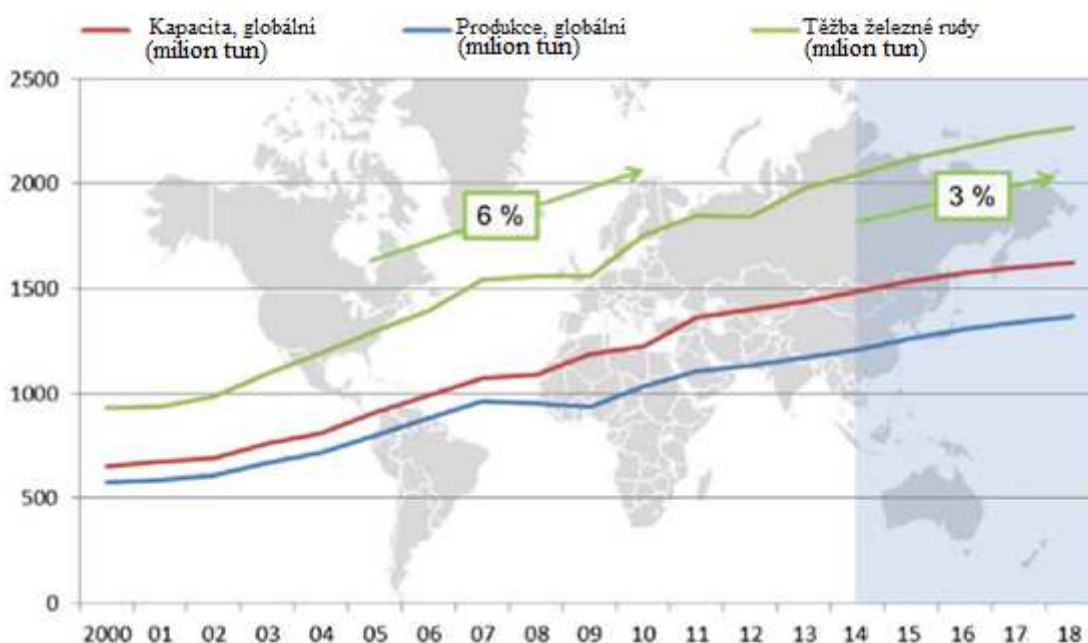
1. Úvod

Pro výrobu surového železa se používá vysoká pec (VP). Mezi výhody vysoké pece se řadí zejména vysoká produkce surového železa a po spuštění nepřetržitá produkce. Pec pracuje nepřetržitě desítky let a zastavuje se jedině pokud je potřeba obnovit vysokopecní vyzdívku. Zároveň je v rámci tohoto procesu získáváno prakticky veškeré železo ze vstupních surovin. Naopak nevýhodou je potřeba předupravených surovin, ale také paliv, jejichž příprava vyžaduje značné množství energie a je zdrojem škodlivin, které nepříznivě působí na životní prostředí. Železná ruda i koksovatelné uhlí se těží, což je velmi ekologicky zatěžující. Produkce surového železa ve vysokých pecích se jeví jako perspektivní směr, neboť v rámci celosvětové produkce na ni připadá více než 90% výroby. Jedním z největších producentů železné rudy jsou Čína, Japonsko a v posledních letech i Indie. Tyto státy vyprodukují až 70% železné rudy z celkové produkce [1]. Železná ruda se v minulosti těžila i na území České republiky a uhlí se stále těží. Správným výběrem vhodných rud a stanovením těch nejdůležitějších vlastností je možno množství vznikajících škodlivin podstatně snížit, či minimalizovat. Současné i historické trendy globální produkce oceli naznačují růst, což následně vyvolává otázky v souvislosti s těžbou primárních zdrojů, zpracováním druhotných surovin, energetickým potenciálem a využitím alternativních paliv k zefektivnění a optimalizaci výrobního procesu [1].

V bakalářské práci budou blíže rozebrány trendy výroby surového železa, také způsoby předúpravy železné rudy před vstupem do vysoké pece. Pozornost bude zaměřena i na ekologické dopady při výrobě železa, možnosti náhrady palivové části biomasou a na produkty z biomasy, jako je biouhlí. Analyzována bude plynodynamická stránka procesu výroby aglomerátu, zejména prodyšnost. Následně také chemické, fyzikální a metalurgické vlastnosti. Stručně budou popsány i železorudné suroviny používané v rámci metalurgických podniků v České republice.

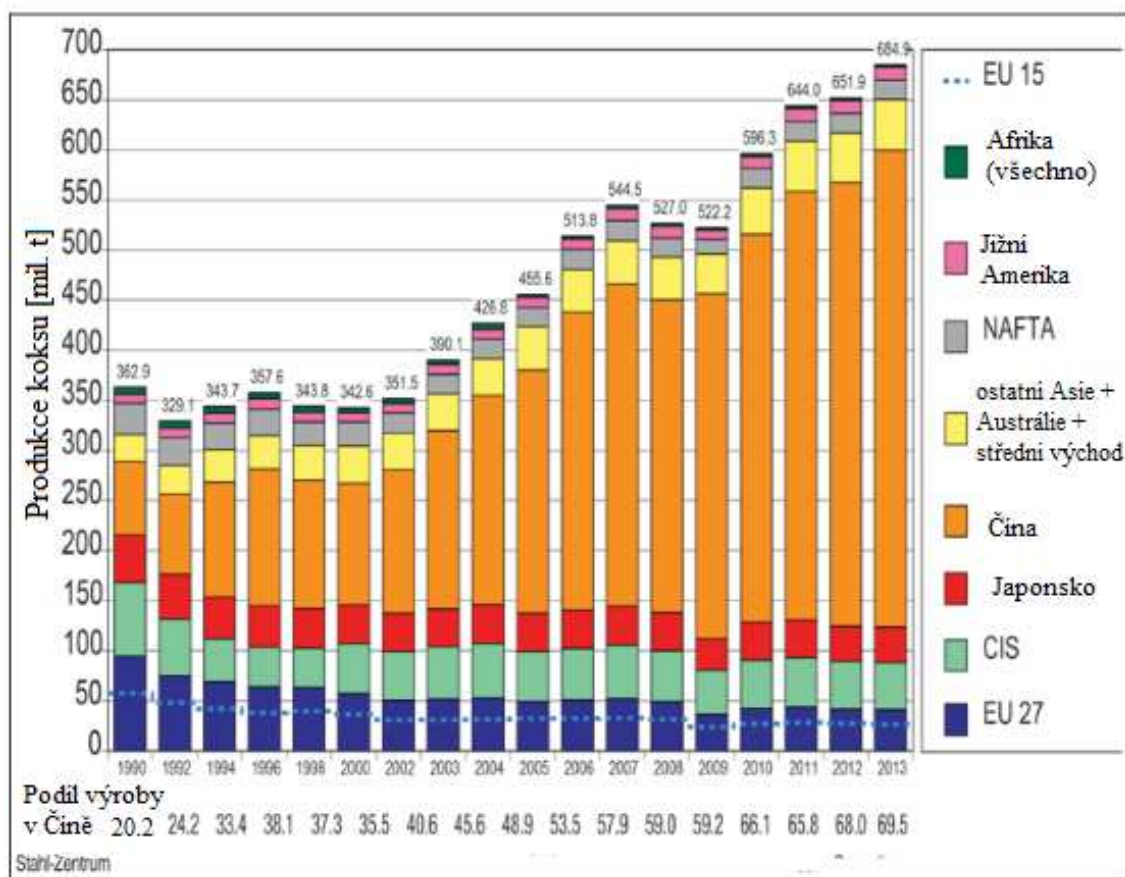
2. Analýza literárních poznatků z oblasti spékání železorudných surovin

Ocel je nezastupitelným materiálem na světě a produkce oceli patří k nejdůležitějším v rámci průmyslu. Nedávný nárůst poptávky po oceli však vyústil v rychlé zhoršování kvality železné rudy na trhu, neboť producenti železné rudy potřebovali zásobovat trh, nebo proto, že některá naleziště železné rudy jsou blízko vyčerpání. **Obrázek č.1** ukazuje, že výroba surového železa ve vysokých pecích, která je tvořena zejména silnou čínskou poptávkou, vzrostla z 575 milionů tun v roce 2000 na 1,2 miliardy tun v roce 2014 [3].



Obrázek č. 1 Srovnání těžby a produkce železné rudy [1]

Tento významný nárůst výroby kovů ve vysokých pecích vyústil ve významné změny v odvětví železné rudy. Roky byl trh s železnou rudou nedostatkovým zbožím, a tak byli zákazníci nuceni akceptovat postupné zvyšování cen a čtvrtletní smlouvy. Vzhledem k tomu, že Čína na trhu nakupuje všechnu železnou rudu, stala se kvalita brzy problémem. Přestože bylo v Číně zaznamenáno nedávné zpomalení výroby oceli a zdá se, že trh je přehlcen železnou rudou, budoucí růst bude nadále vyvíjet tlak na fyzikální, metalurgické a chemické vlastnosti železné rudy. Situace s koksovatelným uhlím je obdobná. Na **obrázku č.2** je vidět, že produkce koksu se v období 2000 až 2013 prakticky zdvojnásobila [1].



Obrázek č. 2 Produkce koksu pro jednotlivé regiony [1]

Existují dva dominantní producenti železné rudy a několik středně velkých producentů. Největším producentem je samozřejmě Austrálie a pak Brazílie s více než 80 % na trhu. Na straně poptávky je však Čína zdaleka největším zákazníkem s více než 60 % [1].

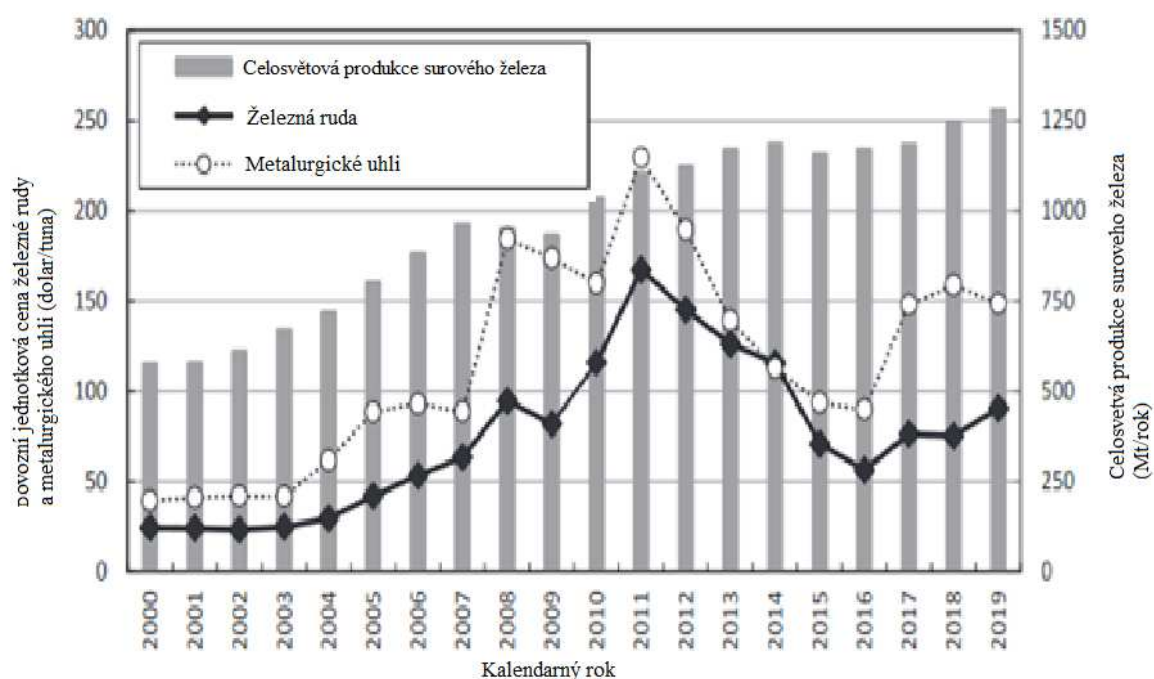
Tabulka č. 1 ukazuje deset největších producentů oceli od r.1990. V pořadí třech nejlepších nedošlo oproti roku 2018 k žádné změně, č. 1 Čína, č. 2 Indie, a č. 3 Japonsko a třetí rok po sobě dosáhla celková světová produkce oceli nového rekordu až ve výši 1 869,92 milionu tun za rok. Spojené státy jsou jedinou zemí, která zaznamenala pokles výroby oceli oproti roku 1990. Nicméně země, které v roce 2019 vzbudily velký zájem v souvislosti s trendy v celosvětovém ocelářském průmyslu, byly Čína a Indie [2].

Tabulka č. 1 Vývojový trend výroby oceli [2]

a	1990	2000	2010	2016	2017	2018	2019	Rychlost změn (%) 2019/2018
1	USSR 154436	Čína 128500	Čína 638743	Čína 807609	Čína 870855	Čína 920027	Čína 996342	Čína 8.3
2	Japonsko 110339	Japonsko 106444	Japonsko 109599	Japonsko 104775	Japonsko 104661	Indie 109272	Indie 111246	Indie 1.8
3	USA 89726	USA 101803	USA 80495	Indie 95477	Indie 101455	Japonsko 104319	Japonsko 99284	Japonsko ↑4.8
4	Čína 66349	Rusko 59136	Indie 68976	USA 78475	USA 81612	USA 86607	USA 87927	USA 1.5
5	Německo 44000	Německo 46376	Rusko 66942	Rusko 70453	Rusko 71491	Jižní Korea 72464	Rusko 71570	Rusko 0.7
6	Itálie 25467	Jižní Korea 43107	Jižní Korea 58914	Jižní Korea 68576	Jižní Korea 71030	Rusko 72042	Jižní Korea 71421	Jižní Korea 1.4
7	Jižní Korea 23125	Ukrajina 31767	Německo 43830	Německo 42080	Německo 43297	Německo 42435	Německo 39675	Německo 6.5
8	Brazílie 20567	Brazílie 20569	Ukrajina 33432	Turecko 31517	Turecko 37524	Turecko 37312	Turecko 33743	Turecko 9.6
9	Francie 19016	Indie 26924	Brazílie 32948	Brazílie 31642	Brazílie 34778	Brazílie 35407	Brazílie 32236	Brazílie 9.0
10	UK 17841	Itálie 26759	Turecko 29143	Ukrajina 22968	Itálie 24068	Irán 24520	Irán 31900	Irán 30.1
Celosvětově	770458	848934	1433432	1690096	173171	1808373	1869915	3.4

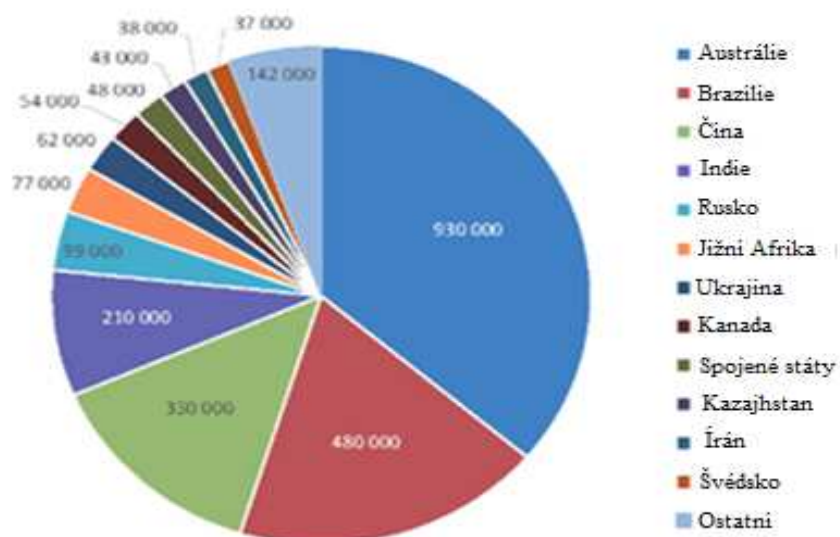
Z hlediska železných rud a s ohledem na ekologické problémy v Brazílii a narušení dodávek z Austrálie se celková produkce železné rudy (od roku 2018) snížila o 10,1 %. Proto cena železné rudy rychle vzrostla z průměrných 67.8 USD na tunu až na dvojnásobek ceny za půl rok. V prosinci však cena opět klesla, došlo k obnově produkce v Brazílii a celosvětovému poklesu poptávky hlavně v Evropě [2].

V 2018 cena metalurgického uhlí činila průměru 98,60 USD na tunu, následně v lednu 2019 cena klesla na 1449,84 korunu na tunu v důsledku celosvětového poklesu poptávky v kombinaci se slabou poptávkou po oceli v Číně. **Obrázek č.3** ukazuje dlouhodobý vývojový trend cen surovin pro výrobu surového železa a průměrné dovozní ceny železné rudy a metalurgického uhlí podle Světové ocelářské asociace [2].



Obrázek č. 3 Produkce surového železa [2]

Kvalita železné rudy a její vlastnosti jsou ovlivněny místem těžby, z celkového počtu 55 zemí jen 5 zemí tvoří tři čtvrtiny produkce železné rudy viz. **obrázek č.4.**

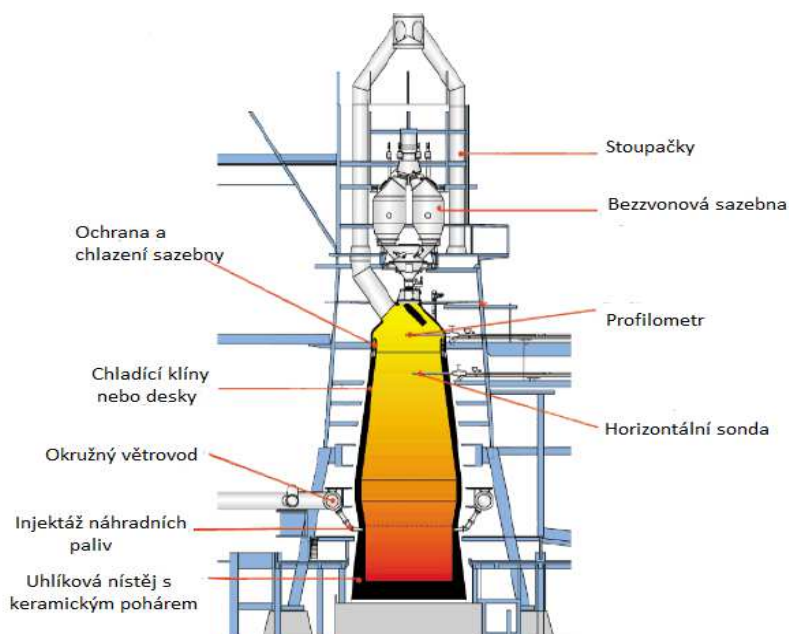


Obrázek č. 4 Podíly těžby železné rudy [3]

Využívání světových rud je hlavně určeno dostupností a cenou jednotlivých typů k poměru chemického složení. Aglomerát vyrobený z brazilské rudy je prakticky beze nečistot a má relativně homogenní strukturu, proto je hodně používán. V České republice je nejvíce používaná ukrajinská ruda Kryvbas, hlavně kvůli své dostupnosti [3].

2.1. Vysokopecní produkce

Vysoká pec slouží pro výrobu tekutého surového železa ze železnorudné vsázky. Samotný proces výroby surového železa se skládá ze vsázení vstupních materiálu – vsázky (železná ruda, koks a struskotvorné přísady) vrchním otvorem – sazebnou. Roztavená slitina železa je následně odvedena z nístěje přes odpichový otvor spolu se struskou. Horký, pod tlakem vháněný vzduch, je foukán do vysoké pece přes dmyšny (výfučny), dochází k hoření koksu a injektovaného paliva a k vytvoření tepla potřebného k roztavení železných rud, koksu a přísad. Při hoření koksu a tavení železných rud vznikají plyny (redukční) které stoupají nahoru skrze vsázku [4]. Výrobnost vysoké pece je okolo 4-12 tisíc tun surového železa za den. Teplota tavení železné rudy je kolem 1500°C. Vysokopecní proces je kontinuální a pracuje s vysokou využitelností, typicky pracuje až 95 % dostupného času. Pec se odstavuje jen z důvodu výměny některé části, z bezpečnostního hlediska, jednou za 12-15 let. Surové železo je odléváno spodem do tzv. „torpédových forem“, následně je surové železo odvezeno do ocelárny, kde se dále zpracovává na ocel. Průřez vysokou pecí je znázorněn na **obrázku č.5** [4].



Obrázek č. 5 Průřez vysoké pece [7]

Mleté uhlí, zemní plyn a ostatní uhlovodíky mohou být injektovány skrze dmyšny. Tyto materiály se používají jako náhrada koksu. Dodatečně se ještě přidávají kyslík a pára [4].

Typické vsázkové materiály sázené shora přes sazebnu:

- Oxidy železa
- Oxidy železa ve formě pelet (8-16 mm)
- Aglomerát (10–45 mm)
- Přírodní ruda

Koks tvoří palivovou část vsázky, mezi jeho nejdůležitější vlastnosti patří reaktivita a dostatečná pevnost. Struskotvorné přísady tvoří MgO a CaO , které umožňují přechod křemičitých a hlinitých vměstku do strusky. Zároveň je struska tvořena dolomitem a vápencem, které podporují přestup nečistot do strusky [4].

2.2. Vstupní suroviny pro výrobu surového železa

Hlavní suroviny a paliva pro výrobu surového železa ve vysoké peci jsou železorudná vsázka a koks. Zároveň se mohou do vysoké pece přidávat struskotvorné materiály a železný odpad [5]. V současnosti je trendem nahrazovat koks biomasou z důvodu ekologie, ale i ekonomiky. Experimenty ukazují značné snížení produkce emisí, bez výrazné změny kvality aglomerátu. Výběr druhu biopaliva zaleží na jeho charakteru. Biomasa rostlinného a dřevěného typu (piliny, skořepiny ořechu ale i dřevěné uhlí) obsahuje mnohem více těkavých látek než běžně využívaný koksový prach. Provedené studie ukazují snížení emisí při náhradě 20 % koksárenského prachu. Zároveň jsou detekovány technologické vlivy biopaliv: snižování maximální teploty, výrazné urychlení vertikálního Spékání. Z chemického hlediska má aglomerát spékáný za přítomnosti biomasy vyšší obsah silikátu a železitanu vápenatého znázorněné na následný **tabulce č.2** [5].

Kovonosnou vsázku tvoří železo-rudné koncentráty, jemné rudy a vratný aglomerát. Nejběžněji využívané železné rudy jsou hematit a magnetit. Mezi nejdůležitější vlastnosti patří chemické složení a také granulometrie. Z chemického hlediska železné rudy rozdělujeme na bezvodé oxidy, hydratované oxidy, křemičitany a uhličitany. Mezi nejběžnější rudy, využívané v metalurgii, patří – hematit (Fe_2O_3), magnetit (Fe_3O_4) a limonit ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$). Nejvýhodnější a nejrozšířenější železnou rudou je hematit hlavně kvůli vysokému obsahu Fe prvku a malému obsahu škodlivých nečistot [4].

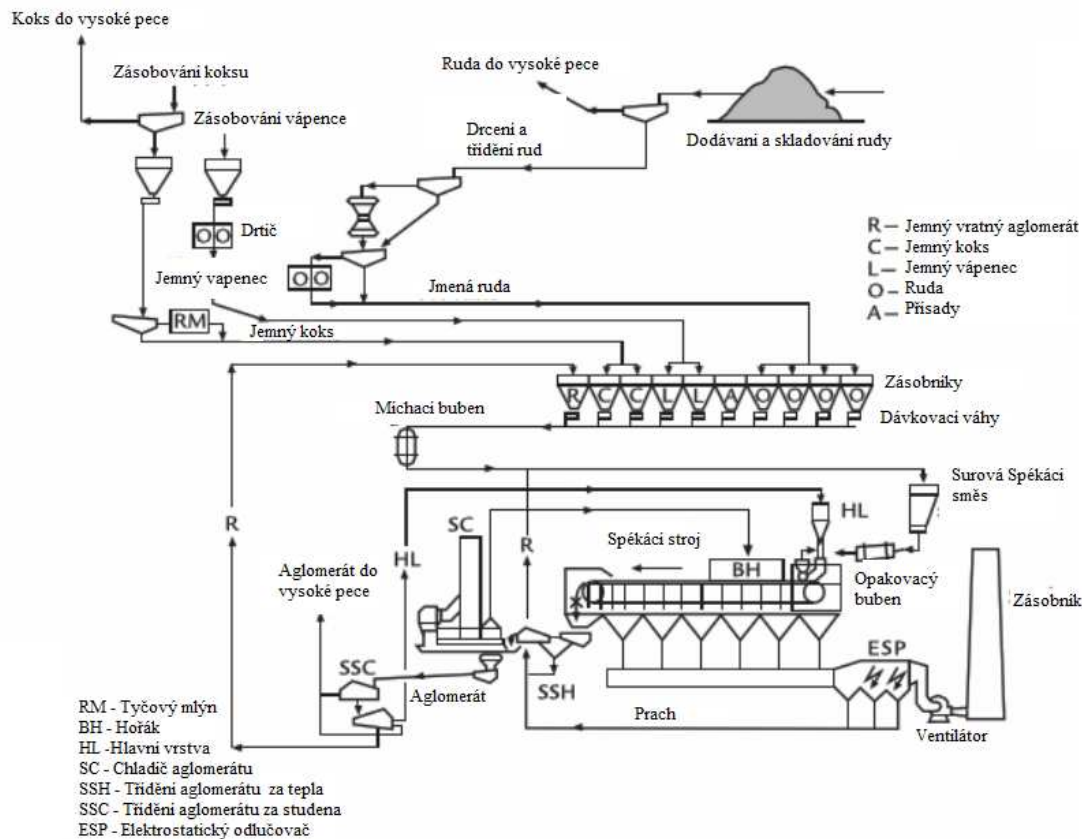
Tabulka č. 2 Porovnání fázového složení jednotlivých vzorků [6]											
Druh	Fáze	A1		DU44		DU86		OS35		OS50	
		[%]..	Σ	[%]..	Σ	[%]..	Σ	[%]..	Σ	[%]..	Σ
Oxidy železa	Fe ₂ O ₃	36,34		20,77		30,02		19,21		19,89	
	Fe ₃ O ₄	23,81	60,51	32,43	53,69	20,16	50,66	34,29	53,86	19,29	39,57
	Fe _{1-y} O	0,36		0,49		0,48		0,36		0,39	
Křemičitany	Ca ₂ SiO ₄	6,6		7,22		7,44		10,72		10,19	
	CaFeSi ₂ O ₆	6,49	14,16	8,34	16,96	4,94	14,06	6,31	19,52	7,40	19,67
	CaSiO ₃	1,07		1,4		1,68		2,49		2,08	
Vápenaté ferity	Ca ₂ Fe ₂ O ₅	3,07		5,32		3,52		6,91		6,56	
	Ca ₄ Fe ₉ O ₁₇	2,35		3,91		3,96		3,81		4,72	
	CaFe ₅ O ₇	1,7	13,25	3,21	21,83	5,01	24,16	6,11	22,35	7,53	36,15
	Ca ₂ Fe ₂₂ O ₃₃	5,12		8,79		9,32		5		16,34	
	Ca ₂ (Al, Fe) ₂ O ₅	1,01		0,6		2,35		0,52		1	
Neasimilované nerudné fáze	CaO	-		-		-		1,85		2,45	
	CaMg (CO ₃) ₂	0,97	11,23	0,76	6,54	0,07	8,57	1,15	4,29	0,06	4,6
	SiO ₂	10,26		5,78		8,5		1,29		2,09	

Požadavky na kvalitu železné rudy jsou:

- Vysoký obsah železa
- Minimální obsah škodlivých nečistot
- Vysoký obsah základních oxidu v hlušině
- Minimum problematických prvků jako je síra a fosfor
- Dobrá redukovatelnost
- Vysoká pevnost
- Úzký teplotní rozptyl měknutí
- Minimální obsah drobných částic a jejich rovnoměrné rozložení [4].

2.3. Aglomerace a aglomerát

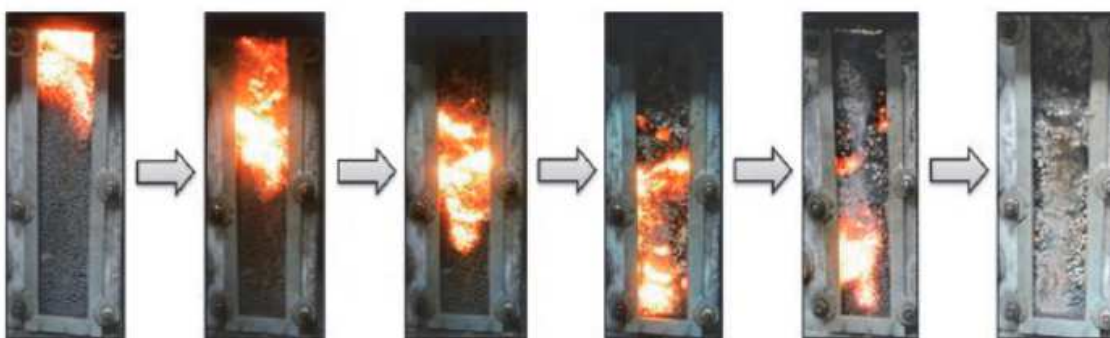
Aglomerace je spékání jemných minerálních částic za vzniku pórovitého spečence za pomoci tepla, které vzniká spalováním koksového prachu v aglomerační vsázce [4]. Schéma aglomeračního procesu je vyobrazeno na **obrázku č. 6**



Obrázek č. 6 Schéma aglomeračního procesu [4]

Proces začíná přípravou aglomerační směsi. Hromady aglomerační směsi se připravují pomocí speciálních zásobníků a regeneračních strojů pro homogenizaci hlavních složek v aglomerační směsi. Aglomerační vsázka správné velikosti je ze skladovacích dvorů dopravována pomocí pásu do skladovacích sil. Ostatní materiál, převážně struskotvorné materiály (vápence) a tuhá paliva (koksový prach, antracit), je před odvozem do sila drcen, anebo jemně mletý. Do aglomerační směsi se taky obvykle přidává vratný aglomerát, jakož i další různé železonosné materiály z oceláren. Ze skladovacích sil se vsázkové suroviny dávkují v daných poměrech, které jsou definovány dle aglomeračního zařízení tak, aby se dosáhlo především dobré mechanické pevnosti aglomerátu [4].

Dávkovaný materiál je dopravován do míchačky, kde se následně mísí, zároveň se tu upravuje vlhkost pomocí dodané vody. Míchačka se obvykle skládá z jednoduchého mísícího bubnu, ale moderní aglomerace, a dokonce i některé starší aglomerace, mají zabudovány vysoce intenzivní mísicí a granulační systémy, aby bylo dosaženo vysoce homogenní směsi. Směsné materiály pak putují do aglomeračních zařízení, která sestávají buď z balících bubnů nebo balících kotoučů, za účelem výroby malých granulí nebo „mikro pelet“. Tyto mikro pelety zlepšují propustnost aglomerační vrstvy, což vede ke zvýšení produktivity aglomeračních pásů. Před-aglomerační směs se pak nasype do sekacího stroje. Spékací stroj je nekonečný pojízdný řetězec paletových nebo roštových vozů, umístěný nad větrnými skříněmi, které pomocí velkých procesních ventilátorů nepřetržitě vsávají vzduch skrz rošt. Na konci vsázky se nachází recyklovaná vrstva ztvrdlého aglomerátu o velikosti 25–50 mm známa jako hlavní vrstva, které chrání vozíky před nadměrným přehřátím. Před-aglomerát se pak opatrně položí na hlavní vrstvu, aby vznikla jednotná, rovnoměrná, homogenní aglomerační vrstva. Ta prochází pod zapalovací hlavou, kde se pomocí plynových hořáku zapálí tuhé palivo v aglomerační směsi. Při postupu aglomerační vrstvy po délce pohyblivého roštu je vzduch stahován ventilátory skrze větrné skříně. Dochází ke spalování paliva po celé výšce. Pohybující se hořící fronta se nazývá spalovací fronta a je zobrazena na **obrázku č.7** [3].



Obrázek č. 7 Termální vyobrazení povrchu aglomerátu po zapálení [3]

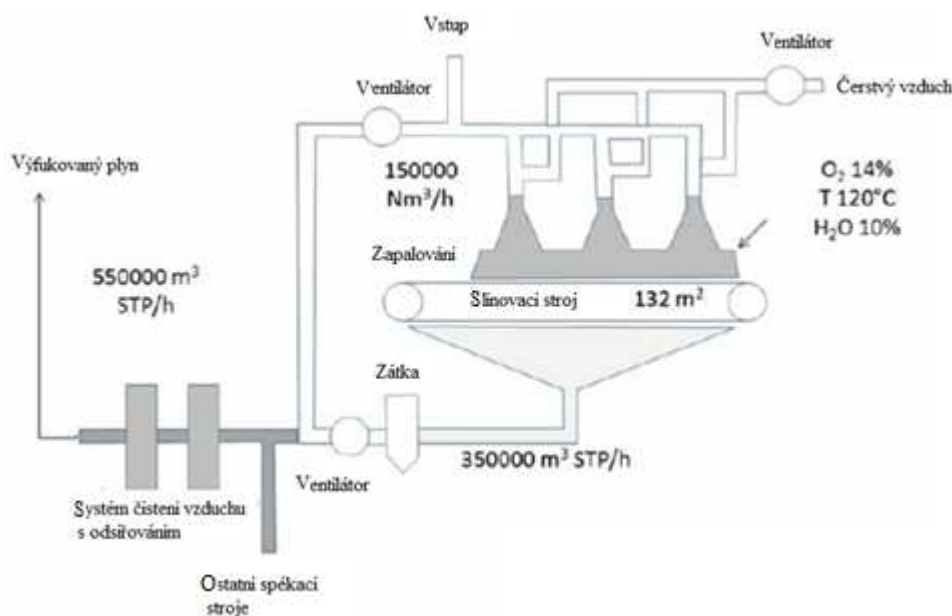
Teplo vytvářené spalováním tuhých paliv zvyšuje teplotu aglomerační vrstvy na nejvyšší teplotu 1300 až 1500 °C. Tím se spojí částice spékané směsi, jinými slovy se směs „spéká“.

Jakmile je toho dosaženo, může být pevný aglomerát vypouštěn na konci putovního roštu, kde je rozdrcen na malé kousky a vysypán na horká síta kde se odstraní jemné částice

aglomerátu, které jsou následně recyklovány zpátky do vstupní části aglomeračního stroje. Horký aglomerát se pak přesune do chladiče, což je prstencový pohyblivý rošt, kde je atmosférický vzduch vyfukován vzhůru ventilátory chladicího vzduchu tak, aby se teplota aglomerátu snížila pod 150 °C. Ze spékacího chladiče se aglomerát vypouští na studená spékací síta, kde se oddělí hlavní vrstva od jemných částic. Hlavní vrstva je pak dopravována do prostoru strojního napaječe a jemné části se pro recyklaci odvádí do sila v dávkovací oblasti. Konečný aglomerát je pak přepraven přímo do skladu pro vysokou pec. [4].

2.4. Emise při spékání a recyklace odpadního plynu

Spékání železné rudy vytváří značné objemy odpadních plynů a jejich zpracování za účelem splnění stále přísnějších ekologických norem je nákladné. Konvenční spékání využívá okolní vzduch k transportu tepla uvnitř spékacího lože, což vyžaduje vysokou rychlost proudění vzduchu. Systém EOS využívá toho, že ke spalování koksu se spotřebuje pouze část kyslíku ve vzduchu. Proto se částečný proud druhotného plynu recykluje přes digestoř, obohacuje se o okolní vzduch na obsah kyslíku 13 až 14 % a používá se jako nasávací procesní vzduch. Tím se objemy druhotného plynu sníží přibližně o 40 až 50 %, aniž by to ovlivnilo spékací proces. V emisním optimalizovaném zařízení se zachycují aglomerační plyny, které jsou pak nuceny znovu cirkulovat, aby přispěly k ohřevu materiálu, viz. **obrázek č.8**.



Obrázek č. 8 Emisní optimalizované spékací zařízení [7]

Tímto způsobem je v atmosféře vypouštěno méně než 50 % odpadního plynu. Recyklace odpadních plynů je založena na zásadě, že část emisí obsahující odpadní plyn se znovu zavede do aglomeračního procesu. Opětovným průchodem přes spékací vrstvy by měly být dioxiny a NO_x částečně zničeny tepelným rozkladem a SO_x a prach by měly být částečně adsorbovány a zadrženy. To vede ke snížení spotřeby tuhých paliv [7].

Přibližně 50 % odpadního plynu se z hlavního kanálu za hlavním dmychadlem vede pomocí přídatného nosného dmychadla do kapot. CO a znečišťující látky jako SO_x , NO_x prach a dioxiny/furany procházejí spékací vrstvou společně s recirkulovaným plynem. Zatímco CO je využit ke spálení, což značně šetří tuhá paliva, znečišťující látky jsou částečně zadržovány ve spékané vrstvě a/nebo tepelně rozloženy. K úpravě obsahu O_2 v procesním plynu se nasaje malé množství čerstvého vzduchu a smíchá se s recyklovaným plynem. Je samozřejmě účinnější recyklovat pouze spaliny ze zadní části, která obsahuje nejvíce emisí. Následně byl na základě této úvahy odvozen proces selektivní recyklace plynu. Tento proces vede ke snížení spotřeby koksu a k získání odpadního plynu bohatého na CO, který lze použít jako palivo. Snížením celkového množství odpadních plynů se sníží investice do čištění plynu s následným snížením emisí dioxinů, furanů, NO_x a SO_x do atmosféry [7].

2.5.Optimalizace vstupních surovin pro aglomeraci a možné náhrady paliva při výrobě aglomerátu

Ruda používaná jako surovina pro spékání je levná, ale snižuje produktivitu procesu, protože váže vodou a má hrubozrnnou strukturu. Tyto problémy lze překonat pomocí vylepšených vsázkových postupů. V Japonsku byly vyvinuty různé metody s cílem zlepšit produktivitu spékání: segregáční šterbinový podavač, zesílený sypací podavač, podavač magnetického brzdění a napáječ typu deflektorové desky. Zlepšení vsázkových postupů umožňuje kontrolovat segregaci rudy a koksu a zlepšit propustnost vsázkového lože snížením objemové hustoty lože v důsledku sníženého tlaku a zavedením segregace velikosti částic při vsázení spékané směsi. Systémy byly vyvinuty s cílem zlepšit výtěžnost produktu a poměr kvality a pevnosti udržováním konstantní velikosti jednotlivých částic suroviny a vsázkových postupů při vsázení surovin na spékací pás. Limonit, používaný jako surovina pro spékání je levný, ale problémy způsobuje skutečnost, že se tato ruda váže vodou a má hrubozrnnou strukturu. Tyto vlastnosti mají dopad na produktivitu celého procesu. Řešením těchto problémů je možné využití levných surovin. Konkrétně, protože je zachována konstantní velikost částic,

zvyšuje se propustnost spékané směsi, což vede ke zlepšení spékacích vlastností a snižuje se návratnost materiálu v důsledku špatného spečení. Tato metoda také umožňuje zlepšit energetickou účinnost [7].

Technologie výroby aglomerátů prošla od svého vzniku mnoha inovacemi a pokrok v oblasti snižování negativního dopadu na životní prostředí se stále více dostává do popředí. Jejím hlavním posláním je snižovat emise CO_2 , a tím snižovat emisní zatížení atmosféry CO_2 . Proto je otázka stanovení požadovaného množství a druhu uhlíkatého paliva pro výrobu aglomerátu pro vysoké pece klíčová. Změna množství paliva v aglomerační směsi mění téměř všechny technologické a kvalitativní ukazatele výroby aglomerátů. Palivo má kritický vliv na teplotní podmínky a podmínky pro redukci oxidu v aglomerační vsázce. Aglomerační hořící fronta pracuje na principu vstupních surovin pohybující se na paletovém roštu ve vodorovném směru po zapálení, zatímco jím je svisle shora dolů nasáván vzduch. Spalování koksu (nebo jiného uhlíkatého paliva) přítomného v aglomerační vsázce je ovlivněno nasávaným vzduchem.

Možná náhradní paliva pro výrobu aglomerátu: [3].

- Antracit
- Dřevěné uhlí
- Biomasa zvaná „technický hydrolyzovaný lignin“
- Odpadní plynná paliva
- Jiný dostupný biologicky odpad s vysokou energetickou hodnotou (oleje, skořepiny, sláma, piliny) [3].

Uvedená možná náhradní paliva mají své výhody a nevýhody, některé jsou ještě ve stádiích výzkumů [8] a zaměřují se na vývoj know-how a procesů, které by mohly vést k podstatnému snížení emisí CO_2 v ocelářském průmyslu. Výzkum se týká procesů, které byly vyvinuty pro zavedení obnovitelných zdrojů uhlíku a energie, stejně jako pro minimalizaci odpadního tepla z procesů. Využívání paliv a redukčních činidel pocházejících z biomasy v metalurgii [8] je možnou alternativou pro snížení emisí CO_2 . Cílem je částečné nahrazení fosilního paliva obnovitelným uhlíkem z udržitelné zdroje, např. z biomasy nebo z lesních odpadů [8].

Možnosti využití biomasy se jeví přínosná nejen proto, že taková paliva mohou být CO_2 neutrální, ale také proto, že stávající železářny a ocelárny mohou být zachovány s malou nebo

žádnou potřebou úprav a kapitálových výdajů. Průkopníkem je Brazílie, která má významnou část železářského průmyslu založeného na udržitelně vyráběném dřevěném uhlí z eukalyptových plantáží. Využívání odpadního tepla z roztavené železářské a ocelářské strusky by rovněž mohlo poskytnout příležitost k dalšímu snížení energetických požadavků, a tím i emisí CO₂ ze strany průmyslu. Dle odhadů pro ocelářský průmysl potenciální úspory energie budou velké. Stejně jako vodní granulace strusky by i suchá granulace mohla přeměnit obrovské množství vysokopecní strusky vyprodukované globálně (400 milion tun za rok) na vstupní suroviny pro výrobu cementu a betonu, což by vedlo k dalšímu snížení emisí skleníkových plynů cementářským průmyslem [8].

Cílem přelomového programu australského ocelářského průmyslu je snížit čisté emise skleníkových plynů prostřednictvím využívání obnovitelných zdrojů uhlíku jako paliv, jakož i využití odpadního tepla z roztavených strusek. Na **obrázku č. 9**, je znázorněný koncept využití biomasy [8].

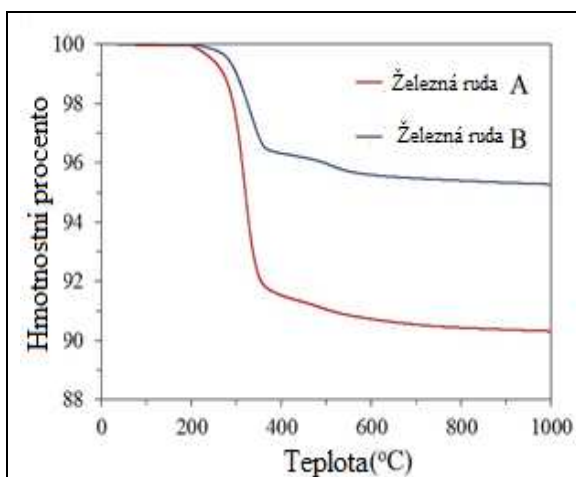


Obrázek č. 9 Koncepční proud pro nízkoemisní proces výroby oceli [8]

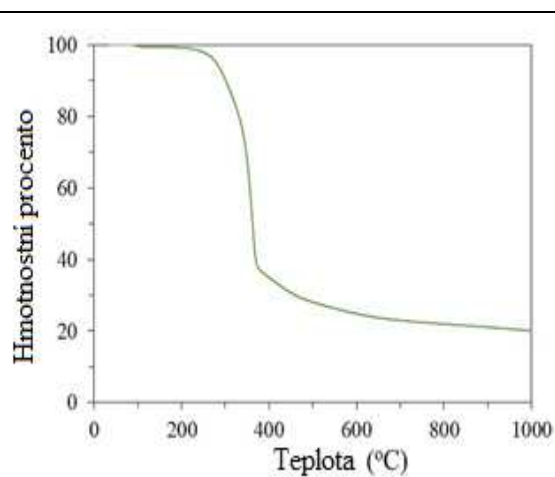
Vzhledem k malému množství popela, síry a fosforu je dřevěné uhlí obecně chemicky lepší než uhelná paliva. To znamená, že optimalizované výrobky by měly vést k úsporám paliva a dalším úsporám v procesech výroby železa a oceli, jakož i k výhodám při využívání obnovitelného uhlíku v boji proti emisím CO₂. Tyto výhody znamenají, že využití dřevěného uhlí mohou mít v několika aplikacích větší hodnotu než tradiční paliva. Dle odhadů [8] by množství vysokopecního koksu mohlo být sníženo o 23-30 kg na tunu surového železa s použitím dřevěného uhlí pro injektáž přes dmyšny až o 4,5-9 kg na tunu surového železa, pomocí náhrady 5-10 % dřevěného uhlí/rudných kompozitů. Průmyslové zkoušky také ukázaly, že dřevěné uhlí je potenciálně účinnějším nahličovadlem kapalné oceli [8].

Bylo prozkoumáno využití biomasy pro různé způsoby výroby železa [9]. **Obrázek č. 10** znázorňuje termogravimetrickou přeměnu rud železa v atmosféře N_2 při 20 °C, což představuje kolísání hmotnosti železné rudy A a B během zahřívání v inertní atmosféře. Významná hmotnostní ztráta je pozorována u obou železných rud v rozmezí 300 až 400 °C, které se snížily z 400 °C až po stabilizaci při vyšších teplotách. Vzhledem k tomu, že železné rudy obsahují goethit, což je hydratovaná fáze, která se obvykle rozkládá mezi 280 a 425 °C, připisuje se hmotnostní ztráta především jeho rozkladu. Celková hmotnostní ztráta těchto železných rud získaná při teplotě 425 °C ukazuje, že množství obsahu goethitu v železné rudě A (8,5 %) je vyšší než v železné rudě B (3,7 %). Jemná hmotnostní ztráta pozorovaná u železné rudy B a v menší míře i u železné rudy A, při teplotě kolem 500 °C, může být navíc spojena s jinými fázemi rozkladu, protože v železných rudách často existují jílové minerály [9].

Hmotnostní ztráta biomasy během pyrolýzy je vidět na **obrázku č. 11**, který ukazuje termogravimetrickou přeměnu biomasy v atmosféře N_2 při 20 °C. Úbytek hmotnosti biomasy začal při teplotě asi 250 °C a postupně postupoval až na 380 °C. V tomto rozmezí dosáhla ztráta hmotnosti přibližně 65 %. Z 380 °C se rychlost úbytku hmotnosti zřetelně snížila a při 800 °C je zbývající hmotnost téměř konstantní na 20 % až do konce zkoušky (1000 °C). K největší degradaci biomasy dochází do 400 °C. Výtěžnost získaná při zkouškách souhlasí s chováním vývoje těkavých látek během pyrolýzy [9].

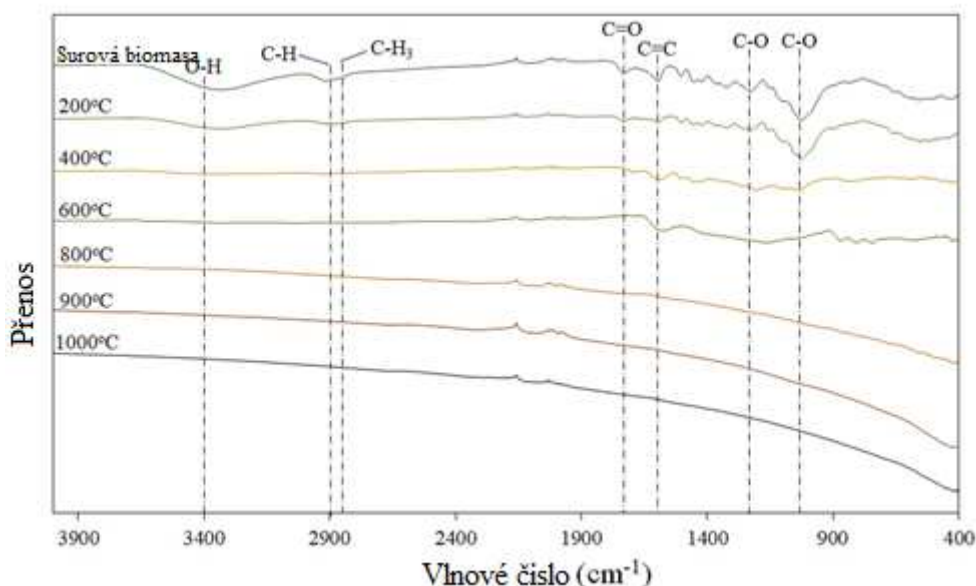


Obrázek č. 10 Termogravimetrická přeměna rud železa [9]



Obrázek č. 11 Termogravimetrická přeměna biomasy [9]

Biomasa byla dále [9] analyzována pomocí spektroskopie za účelem vyhodnocení transformací souvisejících s funkčními skupinami. Spektra FT-IR surové biomasy a biopaliva získaných při různých teplotách, jsou znázorněny na **obrázku č.12**. Obecně zvýšení teploty podpořilo postupné snižování intenzity většiny pásem, přičemž spektrum je čím dále méně složité. Skupiny identifikované ve spektru byly připisovány specifickým funkčním skupinám



Obrázek č. 12 FTIR spektrum biomasy a jejích vzorku získaných při různých teplotách [9].

Ve spektru surové biomasy byly zjištěny následné typické funkční skupiny zahrnující širokopásmová spojení o délce přibližně 3400 cm^{-1}

- spojené s úsekem O–H
- vrcholy související s rozšiřováním C–H
- úsek C– při 2850 cm^{-1}
- a pás s několika vrcholy mezi 1800 a 900 cm^{-1}

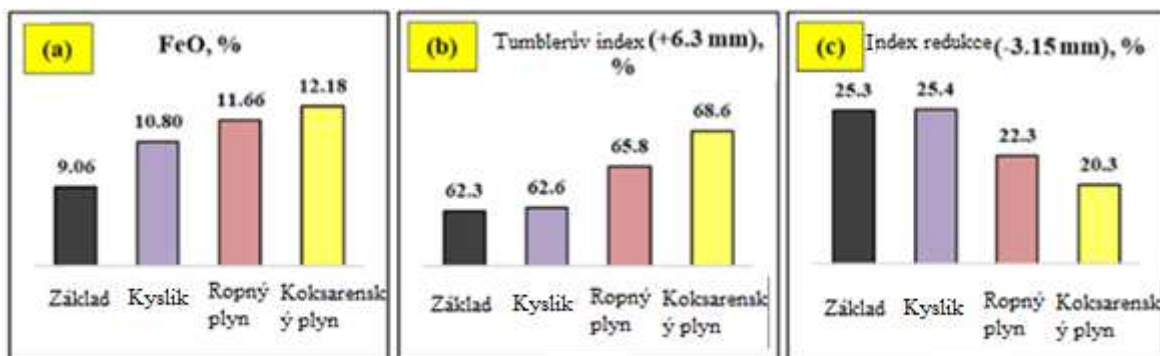
odpovídající různým funkčním skupinám celulózy, hemicelulózy a ligninu. Ačkoli je v tomto rozsahu zjištěno několik vrcholů, nejvýraznější jsou při 1722 cm^{-1} , 1591 cm^{-1} a 1502 cm^{-1} , 1221 cm^{-1} , a 1022 cm^{-1} . Biomasa zahřátá na 200 °C představuje velmi podobné spektrum jako surová biomasa s mírným poklesem úseku O-H. Pyrolyzovaný produkt získaný při teplotě 400 °C vykazuje rozdíly ve srovnání s produktem při 200 °C , kde hydroxylové skupiny zmizely a pásy mezi 1800 a 900 cm^{-1} představoval nižší intenzitu prostupu. Při teplotě 600 °C zůstává

ligninový pás ve spektrech, zatímco ve produktech vyráběných při vyšších teplotách (800, 900 a 1000 °C) všechna pásma zmizela. U těchto vzorků je také zaznamenána výchylka při nízkých vlnových číslech. Celkově nejvýznamnější rozdíly pozorované ve spektru odpovídají poklesu obsahu kyslíku a vodíku se zvyšující se teplotou. Konečná analýza surové biomasy a vzorků je uvedena v **tabulce č. 3**. [9]

Tabulka č. 3 Konečná analýza surové biomasy a jejích vzorků [9]				
Vzorek	C (%)	O (%)	N (%)	H (%)
Surová biomasa	47.62	46.09	0	6.10
Vzorek při 200 °C	48.71	44.99	0	6.09
Vzorek při 400 °C	70.42	24.82	0	4.23
Vzorek při 600 °C	83.38	12.50	0.23	3.03
Vzorek při 800 °C	88.94	8.07	0.26	1.75
Vzorek při 900 °C	90.51	6.79	0.27	1.46
Vzorek při 1000 °C	97.13	0.14	0.37	1.3

Dle studie [10], analyzující redukci železné rudy těkavými látkami z biomasy je nutno objasnit příslušné kroky a hledat optimalizaci využití biomasy v železářském průmyslu. Výsledky této studie [10] ukazují, že hodnota ztráty tepla při zapalování vzorku, hodnota indexu redukce je ve všech případech téměř konstantní. Obsah FeO se považuje za ukazatel celkového dodaného tepla vzhledem k tomu, že vyšší je tepelný příkon, vyšší bude tvorba FeO. Dodatečné teplo dodávané zkapalněným ropným plynem a koksárenským plynem s vyšší výhřevností způsobilo, že proces byl intenzivní a napomohl vzniku většího množství FeO. U daného cílového FeO ve výši 9 % v aglomerátech se dodatečně vytvořený FeO považuje za ukazatel možnosti pro snížení tuhého paliva. V případě dmýchání kyslíku se vytvořilo asi 1,8 % dalšího FeO; v případě injektáže zkapalněného ropného plynu 2,6 % a v případě injektáže plynu z koksárenských pecí 3,12 %. Tato injektáž uspořila přibližně 2, 4, a 6 kg na tunu tuhého paliva. **Obrázek č.13** znázorňuje nárůst pro FeO, Tumblerův index a úbytky v rámci redukčního indexu vznikly v důsledku injektáže kyslíku a ostatních plynu. Vyšší Tumblerův index v případě ropného a koksárenského plynu je způsoben zahuštěním a minimalizací pórů

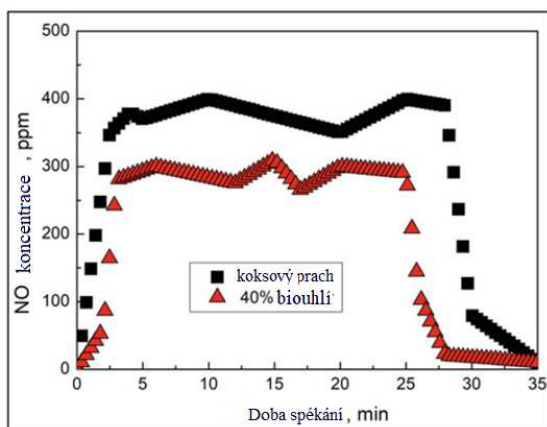
přítomných v aglomerátu. Nižší redukční index naznačuje lepší stabilitu aglomerátu. Nižší hodnota redukčního indexu je způsobena vysokou hodnotou FeO a zhuštěním [10].



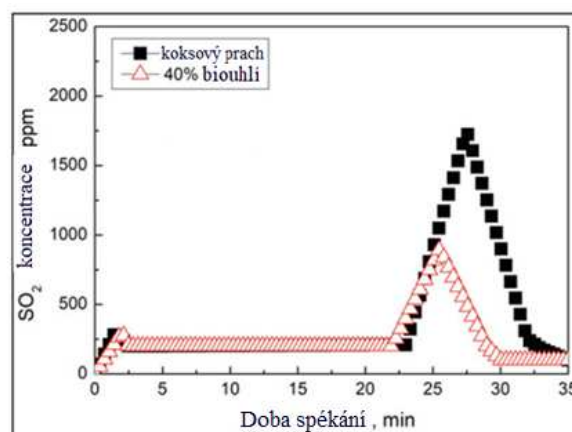
Obrázek č. 13 Hodnoty FeO, Tumblerův index a Indexu redukce u aglomerátu [10]

Vliv „odpadních“ plynů na snížení emisí v rámci aglomerace byl předmětem výzkumu v zahraničí [4]. Byl hodnocen vliv nahrazování fosilních paliv částečně plynými palivy na emise CO₂ v aglomeračních zařízeních. Palivové plyny, jako je koksárenský plyn a zkapalněný ropný plyn, byly injektovány do spékacího zařízení, aby bylo vidět vliv na rychlost a parametry spékání. V případě obou plynů došlo ke zhuštění, které vedlo ke zvýšení pevnosti za studena i za tepla. Zrychlení procesu spékání bylo zaznamenáno při další injektáži kyslíku [4].

Po náhradě koksu biouhlem se výrazně snížily koncentrace SO₂ a NO, tato změna je vyobrazená na následujících **obrazcích č.14 a č.15** [4].



Obrázek č. 14 Koncentrace NO během spékání [4]



Obrázek č. 15 Koncentrace SO₂ během spékání [4].

Biouhlí má nižší teplotu, při které se vzplane a rychleji vyhoří než koks, což urychlí postup fronty hoření. Tím se zlepší i rychlost spékání, ale má to nevýhody. Protože se zvýší rychlost, tak konzistence teploty a rychlosti fronty hoření klesne. Biouhlí má vyšší reaktivnost, a prudce reaguje z CO_2 . Velké množství, CO vytvořené na povrchu biouhlí má za následek snížení účinnosti spalování kvůli vysokému množství, CO , které je vytvořeno později při spalování, což má za následek, že bude vstupovat do spalin. Z této úvahy vyplývá, že náhrada koksu biouhlím má za následek zvětšení produktivity a zmenšení emisí, ale jeho nedostatkem je snížení efektivity produkce aglomerátu [4].

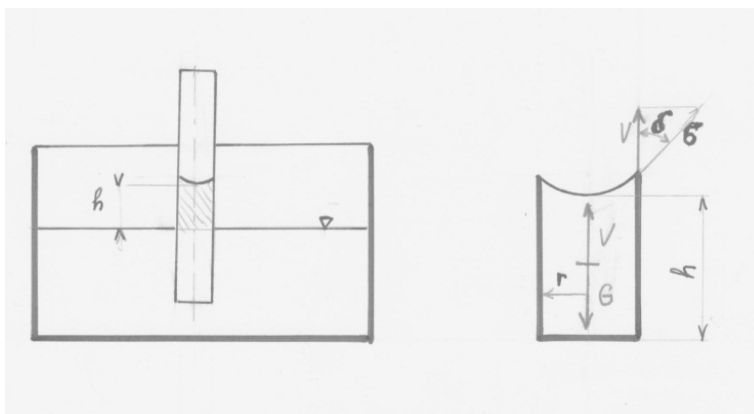
Co je to vlastně to Biouhlí (Biochar)? Biouhlí je druh dřevěného uhlí produkovaného spalováním biomasy (ekologického materiálu), přičemž se uhlík v biomase přeměňuje do formy, která odolává rozpadu. Když je dřevěné uhlí uloženo bez přístupu vzduchu, nebo přidáno do půd, většina uhlíku může zůstat v dřevěném uhlí nebo půdě po desetiletí až staletí, vzhledem ke správným podmínkám.[11]

2.6.Plynodynamická stránka procesu spékání

Výrobnost aglomerace nejvíce ovlivňuje proudění spalin a vzduchu aglomerační vrstvou. Prodyšnost zrnité vrstvy je definována jako množství vzduchu prosávaného přes jednotku plochy, za jednotku času. Prodyšnost spékané směsi je silně závislé na její vlhkosti, chemickém složení, fyzikálních vlastnostech, zároveň velmi těžko řídí a kontroluje hlavně kvůli granulometricky značné nehomogenitě směsi [11].

Protože prodyšnost zrnité vrstvy zatím není možno v praxi kontinuálně určovat, nahrazuje se většinou hodnotou tlakové ztráty v zrnité vrstvě.

Tlakovou diferenci je možno snižovat hlavně zvětšováním středního průměru zrna vsázky a zlepšováním součinitele tvaru zrna. Pro tyto vlastnosti zrn má velký význam funkce sbalovacího bubnu, tedy tvorba mikropolet při míchání aglomerační směsi. Tvorbu mikropolet značně ovlivňují kapilární síly, které jsou hlavní příčinou tvorby kulovitých sbalků. Schéma této rovnováhy v kapiláře zobrazuje **obrázek č.16** [11].



Obrázek č. 16 Rovnováha sil v kapiláře [11]

Vlivem kapilární elevace se hladina kapaliny ustálí ve výšce $-h$. Na sloupec kapaliny působí gravitační síla $-G$ a kapilární síla $-V$, která vzniká pomocí působení povrchového napětí $-σ$. Z **Obrázku č.16** lze vyjádřit vzorec pro míru kapilárních sil (1). Výsledný vzorec pro výpočet vodního sloupce v kapiláře [11].

Výška vodního sloupce v kapiláře h , která je znázorněná v **rovnici č.1**, která je mírou kapilárních sil, které umožňují za přítomnosti vody sbalování jemnozrnných surovin při pohybu na nakloněné rovině. Při konstantní složení vody, teplotě, povrchového napětí a hustoty vody na určitém místě můžeme považovat část uvedeného výrazu k_1 za konstantu. Vypočet konstanty k_1 je v následné **rovnici č.2** [11].

Tedy když vyjmeme z **rovnice č.1** a nahradíme ji **rovnici č.2** tak dostaneme vztah pro výpočet míry kapilárních sil, který je **rovnici č.3** Podle Laplace při malém rozptylu zrn existuje lineární závislost mezi velikostí mezer a průměrem zrn. Tedy podle této úvahy lze vztah **Rovnice č.3** zapsat ve tvaru následující **rovnice č.4** [11].

(1)

$$h = \frac{2\sigma \cos \varphi}{r \rho g}$$

(2)

$$h = \frac{k_1}{r}$$

(3)

$$h = \frac{k}{R}$$

(4)

$$k_1 = \frac{2\sigma \cos \varphi}{\rho g}$$

h – výška kapilární elevace

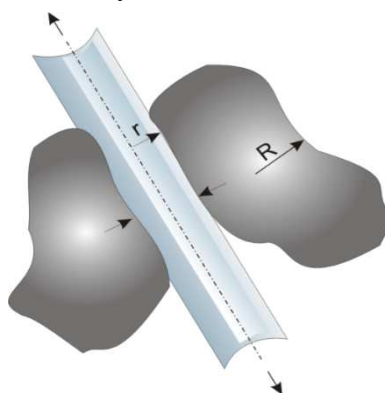
r – poloměr kapiláry

k_1 – konstanta pro vlastnosti vody (hustota, teplota atd.)

k – Konstanta závislá na K_1

Podle **rovnice č.1** jsou kapilární síly jsou nepřímo úměrné poloměru kapiláry. Základní princip sbalování zrn je schematicky znázorněn na **obrázku č.17** [11].

R – poloměr středního zrna vsázky



Obrázek č. 17 Princip sbalování zrn [11]

Směs drobných zrn rud, koksu koncentrátů a zásaditých přísad tvoří aglomerační směs. Mezery mezi zrny v této směsi je možno považovat za kapiláry. Lze určit závislost kapilárních sil na průměru a množství mezer mezi jednotlivými zrny aglomerační směsi. Je zřejmé, že existuje lineární závislost mezi velikostí mezer a průměrem zrn pod podmínkou malého rozptylu zrnitosti [11].

Z **rovnice č.4** vyplývá, že nejjemnější zrna se sbalují nejlépe. Proto se používají k peletizaci nejjemnější koncentráty. Tato úvaha neplatí vždy, např. když směs přesáhne určitou vlhkost, tak protilehlé kapiláry ve směsi se spojí a kapilární síly se vyruší, směs se rozpadne a prodyšnost prudce klesne [11].

Vsázka se zapaluje směsným plynem pomocí speciálního zapalovače. Tento zapalovač musí vyvinout velké množství tepla za určitý čas při určitém podtlaku. Po zapálení se vytvoří fronta hoření o rychlosti pohybu hoření $0,03 - 0,04 \text{ cm.s}^{-1}$. Spékanou vrstvou probíhají dvě tepelné vlny. Protože rychlost výměny tepla neumíme regulovat, se snažíme regulovat rychlost hoření koksu. Tuto regulaci provádíme pomocí zrnitosti koksu [11].

3. Charakteristika procesu a požadavky na vlastnosti železnorudných surovin

Požadavky na vlastnosti a kvalitu železnorudných surovin pro vysokou pec jsou definovány především rozměrovou distribucí, pevností za studena, vlastnostmi ovlivňujícími rozpad v průběhu redukce a chemickým složením (obsahem železa a také bazicitou). Chemické složení a rozměrové charakteristiky (frakce $-0,5$ mm) surovin jsou uvedeny v **tabulce č.4**.

Tabulka č. 4 Fyzikálně chemické vlastnosti sekacích materiálů [12]

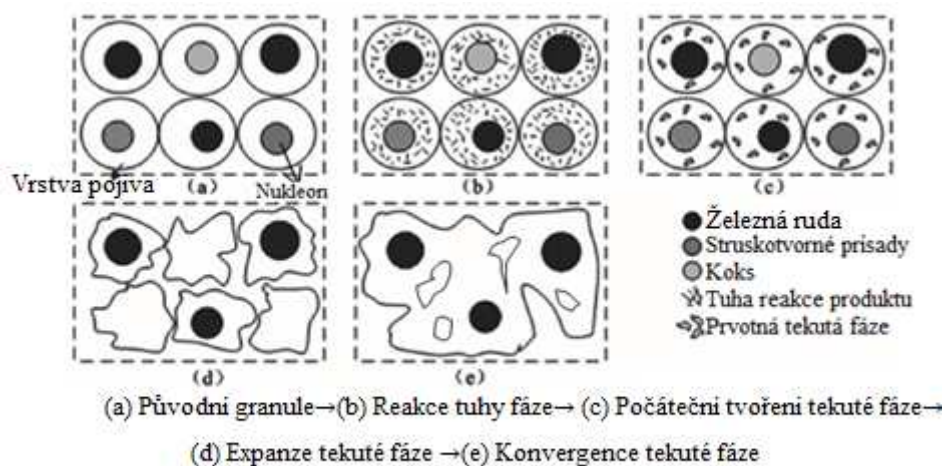
materiály	Velikost frakci	Chemická složka/%							Frakce z-0.5 mm/%
		Fe	FeO	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	LOI	
Brazílie Ruda	Všechny	63.86	5.02	0.10	0.11	4.59	1.14	2.23	40.00
	-0.5 mm	62.63	2.51	0.06	0.22	5.83	1.31	2.56	
Austrálie Ruda	Všechny	62.13	2.59	0.33	0.26	3.80	1.93	4.52	45.20
	-0.5 mm	62.81	0.53	0.68	0.08	4.54	3.37	6.19	
Indie Ruda	všechny	63.32	1.72	0.05	0.16	2.84	2.32	3.52	47.75
	-0.5 mm	63.84	0.50	0.07	0.18	3.33	2.25	2.74	
Jižní Afrika Ruda	všechny	65.04	0.57	0.15	0.17	4.01	1.44	0.98	16.30
	-0.5 mm	63.00	0.86	0.26	0.22	5.38	1.99	1.59	
Čína Ruda	všechny	63.46	22.42	1.19	0.82	5.97	0.89	1.11	94.62
	-0.5 mm	63.55	23.10	1.02	0.77	5.85	0.83	1.10	
Nehašené vápno	všechny	0.40	0.23	80.66	1.18	2.86	1.20	12.36	57.13
Vápenec	všechny	0.21	0.13	50.66	2.28	1.49	0.72	40.72	34.57
Dolomit	všechny	0.14	0.10	32.64	19.83	0.71	0.43	46.47	38.68
Koks	všechny	0.80	0.11	5.72	0.60	0.12	4.84	86.59	58.27
Vratné produkty	všechny	56.81	6.25	9.02	1.86	5.11	2.00	0.00	37.51

Existuje jedenáct druhů typických železných rud. Mezi nejvýznamnější a nejčastěji v praxi využívané patří:

- Brazilský hematit s vysokým obsahem železa,
- Australský limonit,
- Indická železná ruda s vysokým obsahem oxidu hlinitého,
- Jihoafrický hematit,
- Čínský jemnozrnný magnetit.

Řada železných rud se používá v různém poměru k přípravě rudných směsí s různým složením, takže Fe, obsah SiO_2 a Al_2O_3 lze upravit v poměrně širokém rozsahu mísením rud. Dále je potřeba vápenec, dolomit a nehašeno vápna k zajištění potřebných CaO a MgO komponent pro spékání. Také koks a vratné produkty se přidávají do směsí pro výrobu aglomerátu [12].

Schéma průběhu spékání směsi při aglomeraci je vyobrazeno na **obrázku č.18**. Po granulaci se granulovaná směs použije k spékání. Původní zrno se skládá z lepicí vrstvy a jádra. Reakce v tuhé fázi dochází v adhezivní vrstvě mezi jemnými částicemi železných rud a struskotvornými přísadami, produktem této reakce je sloučenina, která se taví při nízké teplotě. Když se teplota zvýší na bod tání sloučeniny, začne v adhezivní vrstvě vznikat primární kapalná fáze. Při působení primární kapalné fáze se v kapalně fázi roztaví jádro částice, jako je vápenec, dolomit a nehašené vápno, ale kvůli nízké reakční rychlosti jádra železné rudy se nepodílí na reakci. Jak teplota neustále stoupá, kapalná fáze se začne spojovat díky zlepšení tekutosti kapaliny a začnou se vytvářet póry smršťováním kapalně fáze při maximální teplotě. Během poklesu teploty se začnou s kondenzací kapalně fáze tvořit krystaly. A tím tyto kapalně vazby neroztavené rudy začnou tvořit konečný aglomerát [12].



Obrázek č. 18 Schéma průběhu spékací směsi [12]

3.1. Chemické a fyzikální vlastnosti rudných surovin

Vlastnosti rudných surovin odrážejí vlastnosti finálního produktu, v tomto případě se jedná o surové železo. Správné chemické složení rudných surovin zabezpečuje dobrou produktivitu a kvalitu surového železa, ideální chemické složení je v **tabulce č.5** [4].

Tabulka č. 5 Požadované chemické složení rudných surovin [4]			
Chemický prvek	Kusova ruda	Aglomerát	VP pelety
Chemické vlastnosti			
Fe %	65-68	55-58	62-66
SiO ₂ %	1-4	5.6	2-5
Al ₂ O ₃ %	0.5-1.5	1.0-1.3	0.4-1.0
CaO %	<0.1	9-11	1.0-4.5
MgO %	<0.1	1.4-2.0	0.2-1.3
CaO/SiO ₂	N/A	>1.7	0.8-1.1

Hlavní rozdíly v chemických vlastnostech mezi sypkou rudou, aglomerátem a vysokopecními peletami jsou celkový obsah železa, celkový obsah kyselé hlušiny a binární bazicita. [4]

Obsah železa (Fe): Vysoce kvalitní komerční kusové rudy mohou dosahovat až 65-68 % Fe, i když jsou stále vzácnější a dražší, proto je použití kusové rudy v porovnání se aglomerátem a peletami relativně malé. Typický obsah železa v aglomerátu je přibližně 54-58 % Fe, zatímco pelety mají obvykle 62-66% železa. Pelety mají vyšší obsah železa než

aglomerát, protože aglomerát je vyráběný z jemně mletých nekvalitních rud, aby mohly být podrobeny minerální úpravě za účelem zvýšení obsahu železa [4].

Kyselost ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$): Celkový obsah kyselosti je definovaný jako $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$. Obsah kyselé hlušiny je výrazně nižší v kusové rudě a peletách ve srovnání s aglomerátem. Hlavní výhodou materiálů s nižším obsahem hlušiny je následná snížena produkce vysokopeční strusky. Ze složení strusky, která pozůstává z kyselých materiálů přítomných v železonosné vsázce, obsahu popela v koksu, prosáženém uhlí a z přidaných struskotvorných přísad vyplývá, že z méně kyselé vsázky vznikne méně strusky na tunu surového železa. Nižší množství strusky se přímo promítá do nižšího množství použitého koksu, protože k roztavení strusky a vápníku je zapotřebí více energie. Kromě nižších podílů koksu je další přímou výhodou nižšího podílu strusky to, že následné pochody probíhají s menším objemem strusky [4].

Binární Basicita (CaO/SiO_2): Další rozdíl v chemickém složení vsázkových materiálů do vysoké pece definuje binární basicita (B_2), která je definovaná jako poměr CaO/SiO_2 . Pelety mají rozmezí poměru B_2 od 0 pro kyselé pelety a od 0,81 po 1,1 pro tavené pelety. V aglomerátech je poměr B_2 obvykle stanoven na 1,7 nebo více, aby se zlepšila produktivita spékání a dosáhlo se dostatečné pevnosti aglomerátu, aby odolaly manipulačním operacím s materiálem. Pro kusovou rudu není binární basicita relevantním parametrem, protože v kusové rudě je přirozený se výskyt CaO a MgO zanedbatelný. Vysoká zásaditost aglomerátu ve srovnání s peletami negativně ovlivňuje provozní náklady. Za prvé vyžaduje vyšší spotřebu struskotvorných přísad (vápence a/nebo dolomitu), aby se dosáhlo cílové zásaditosti strusky. Za druhé, zvyšuje rychlost tvorby strusky, protože přidané struskotvorné přísady generují vyšší objem strusky [4]. Už dříve zmíněné optimální fyzikální vlastnosti vsázky do vysoké pece jsou znázorněné v **tabulce č.6**

Tabulka č. 6 Požadované fyzikální vlastnosti rudných surovin [4]			
	Kusová ruda	Agglomerát	Pelety
Fyzikální vlastnosti			
Rozložení velikosti zrn	>31.5 mm: Max. 5 %	>50 mm: Max. 10 %	>16 mm: Max. 5 %
	6.3-31.5 mm: Min. 85 %	<10 mm: Max. 30 %	8-16 mm: Max. 85 %
	<6.3 mm: Max. 5 %	<6.3 mm: Max. 5 %	<6.3 mm: Max. 5 %
Odolnost proti nárazu a otěru (ISO 3271)	>6.3 mm: Min. 95 %	>6.3 mm: 70 % - 80 %	>6.3 mm: Min. 95 %
	<0.5 mm: Max. 5 %	<0.5 mm: Max. 5 %	<0.5 mm: Max. 5 %
Pevnost za studena	N/A	N/A	Průměr Min 2500 N
			<2000 N: Max 10 %
			<1500 N: Max 5 %

Nejdůležitějšími fyzikálními parametry pro železorudnou vsázku jsou granulometrie, pevnost za studena a odolnost proti nárazu a otěru. První dvě jsou relevantní pro všechny materiály vsázky, zatímco třetí je relevantní pouze pro pelety. Rozložení velikosti je měřena pomocí osévání vstupního materiálu skrze různé síta a vážení množství zachycených zrn pro každé síto. Intenzita absorpce je zkouška kontroly kvality, za účelem měření jejich odolnosti proti nárazu a otěru. Pevnost za studena se vztahuje pouze na pelety. Měří tlakové zatížení, které musí být aplikováno na jednotlivé pelety, aby došlo k rozbití [4].

Dále je možno u aglomerátu a pelet definovat termoplastické vlastnosti. Vysokoteplotní vlastnosti aglomerátů souvisí s bazicitou a mírou jejich předredukce. Intervaly teplot počátku a konce měknutí pro předredukované aglomeráty kolísaly mezi 50-250°C. S vyšší kovatostí aglomerátů docházelo ke snížení teplot počátku měknutí a k prodloužení teplotních intervalů měknutí [11].

4. Analýza vybraných vlastností železoručních surovin pro podmínky ČR

4.1. Železoruční suroviny a aditiva pro proces aglomerace

Prvním krokem pro analýzu vlastností železoručních surovin je zjištění, které rudy se nejčastěji v praxi používají. Toto zjištění může být složité, neboť jednotlivé podniky nakupují suroviny i paliva dle ceny, která se může měnit. Pro základní orientaci jsou v **tabulce č.7** uvedeny základní materiály tvořící aglomerační vsázku v minulých letech v rámci České republiky [14].

Tabulka č. 7 Seznam jednotlivých druhů materiálu použitých v aglomeraci [14]

Název suroviny	
F – Kryvbas	Struska – Ocelářská jemná
F – Zaporozska	Struska – Ocelářská jemná obohacená
F – Liberie	Struska pánvová
F – Carajas Vale	Okuje
F – Brazílie	Výhoz
F – Rudomine	Separát – Cz.Slag
C – Krivoj Rog	Dolomit 0-4
C – Lebedinsky	Vápenec 0-4
C – Sered'	Vápno mleté
C – Jugok	Koksprach AMO
C – Sevgok	Koksprach externí
C – Kovdorsky	Hrášek AMO
C – Ingulecký	Antracit aglo
	Mn ruda Amet

V provozních aglomerátech ČR jsou hlavní strukturní složky : magnetit, hematit, vápenaté ferity a silikáty. Ve struktuře aglomerátu převažuje magnetitová fáze, obsah magnetitu jen výjimečně klesá po 50% objemových.

K měření metalurgických vlastností surovin pro vysokou pec se používají různé zkušební metody. Tyto zkoušky se provádějí za podmínek, které simulují chování vstupních materiálu při vstupu do vysoké pece. Typické, žádané metalurgické vlastnosti vstupních materiálů do vysoké pece jsou uvedeny v **tabulce č. 8** [4].

Tabulka č. 8 Požadované metalurgické vlastnosti vstupních surovin do vysoké pece [4]

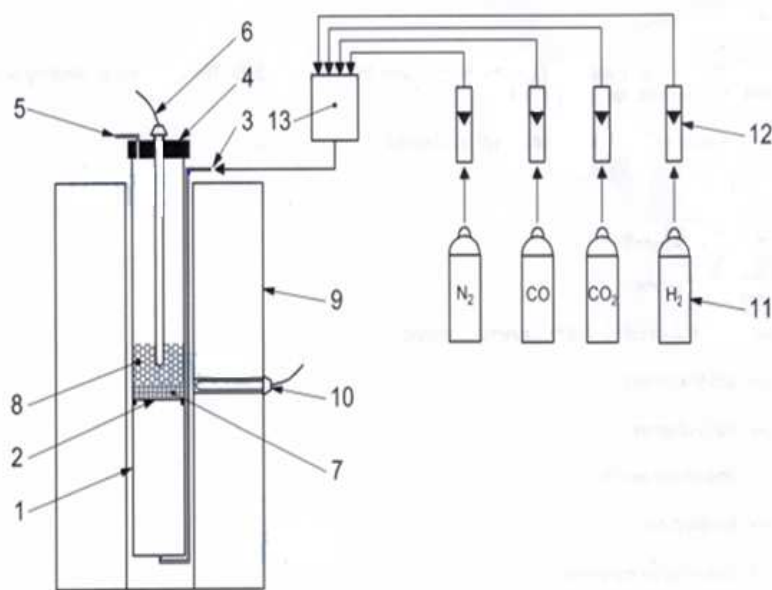
	Kusova ruda	Aglomerát	Pelety
Metalurgické vlastnosti			
Redukovatelnost (ISO 4695)	Min. 0.85 %/min	Min. 1.4-1.6 %/min	Min. 0.8 %/min
Redukovatelnost za snížené teploty – stály rozpad (ISO 4696)	>6.3 mm: Min. 85 %	<3.15 mm: Max. 35 %	>6.3 mm: Min. 85 %
	<0.5 mm: Max. 10 %		<0.5 mm: Max. 10 %
Redukovatelnost za snížené teploty – dynamicky rozpad (ISO 13930)	>6.3 mm: Min. 80 %	N/A	>6.3 mm: Min. 80 %
	<0.5 mm: Max. 15 %		<0.5 mm: Max. 5 %
Redukce pod zátěží (ISO 7992)	dP80%: Max. 15mmWC	N/A	dP80%: Max. 15mmWC
Volný růst (ISO 4698)	N/A	N/A	Max. 20 %

Redukovatelnost (ISO 4695): Jedná se o testování vzorku rudy, aglomerátu nebo pelet za redukčních podmínek, obdobně jako ve vysoké peci. Vzorek se umístí do svislé retorty o průměru 75 mm, která je zavěšena uvnitř elektricky vyhřívané zkušební pece. Vzorek o hmotnosti 500 g a o průměrné velikosti 10- 12,5 mm se nejprve usuší při teplotě 105 °C, poté se vloží do retorty a spustí se do zkušební pece. Vzorek se nejprve přehřeje inertním plynem a poté je redukován horkým redukčním plynem při teplotě 950 °C a se složením 40 % a 60 % CO/N₂ při průtoku 50 l.min⁻¹. Vzorek prochází izotermickou redukcí, dokud ztráta kyslíku nedosáhne 65 %. Index redukovatelnosti znamená rychlost redukce (%/min) dosažené při 40% stupně redukce. Vypočte se změřením doby potřebné k dosažení stupně snížení o 30 % a 60 % a předpokládá se, že rychlost snižování množství kyslíku je reakcí prvního řádu, pokud jde o kyslík, který ve vzorku zůstává [15].

Složení zkušebního zařízení pro redukovatelnost podle normy (ISO 4695):

- redukční trubice
- pec, vybavená váhou
- systém přívodu plynů a regulace průtoku
- řídicí a informační systém
- běžné vybavení laboratoře

Toto zařízení neumožňuje jenom provádět testy dle norem ISO: 4696-1, ISO 4696-2 ale také i testy experimentální. Schéma zařízení je na **obrázku č.19** [15].



1. Retorta
2. Dolní část retorty
3. Přístup plynu
4. Uzávěra retorty
5. Vystoupení plynu
6. Termočlánek
7. Perforovaný panel
8. Vzorek
9. Elektricky vytápěná pec
10. Termočlánek.
11. Tlakové láhve s plyny
12. Průtokoměry
13. Směšovací nádoba

Obrázek č. 19 Průřez testovacího zařízení [15]

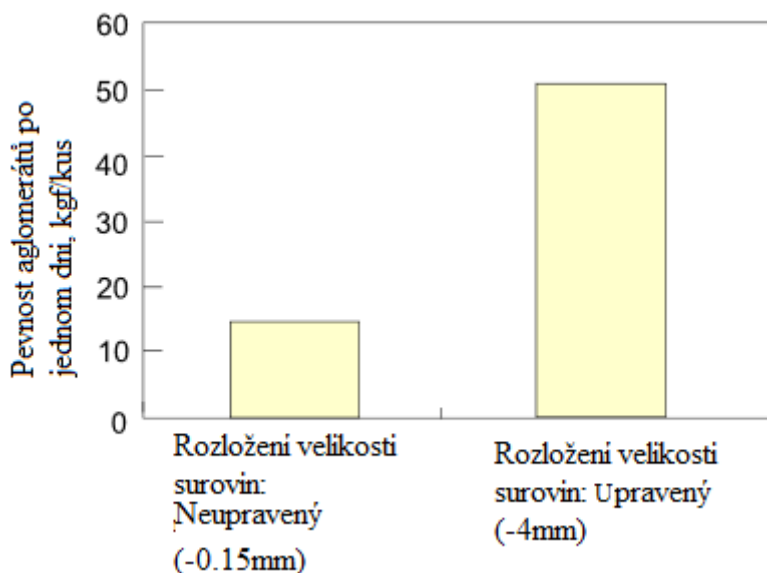
4.2. Vybrané vlastnosti železorudných surovin

Do aglomeračního procesu vstupují primární suroviny, jako je železná ruda, vápenec a koksový prach jako aglomerační materiál a vratný aglomerát, což je aglomerát, který nevyhovuje rozměrovým požadavkům pro vysokou pec a je znovu recyklován v rámci procesu. Pokud poměr vratného aglomerátu roste, výtěžek spékacího procesu klesá, a emise CO_2 se zvýší v důsledku přebytečné energie spotřebované k opětovnému spékání a zvyšuje se i množství koksu [16].

Z tohoto pohledu by poměr vratného aglomerátu měl být snížen, ale poměr vratného aglomerátu k primární surovině zůstává vysoký, na 10 až 20 %. Řešením těchto problémů je vratný aglomerát s velikostí 1-5 mm podrobit velikostní selekci přímo před vstupem do vysoké pece a výtěžek aglomeračního procesu bude zvýšen. Výzkum ukazuje, že výtěžek spékacího procesu byl zvýšen o 10 % při užití drobného podílu vratného aglomerátu přímo ve vysoké peči za podmínky, že poměr vratného aglomerátu ke zdroji železa pro vysokou pec bylo kolem 20 %. Protože je však velikost vratného aglomerátu menší než u jiných zdrojů železa pro vysokou pec, propustnost vysoké pece se přímo zhoršuje při použití vratného aglomerátu [16].

Byly připraveny dva typy aglomerátů s obsahem 10 % hliníkového cementu, přičemž jeden z nich používal surovinu, jejíž velikost byla pouze menší než 0,15 mm, a druhý používal

surovinu, jejíž velikost byla menší než 4 mm. Pevnosti těchto dvou typů aglomerátů za studena byla porovnávána po 1 dni sušení. Jak ukazuje **obrázek č.20**, pevnost za studena aglomerátů vyrobeného ze suroviny s upraveným rozložením velikosti byl 50 kgf/kus a byl více než třikrát větší než aglomerát vyrobený ze suroviny, jejíž velikost je pouze menší než 0,15 mm. [16].



Obrázek č. 20 Vliv distribuce velikosti na pevnost aglomerátů [16].

Do testovaného aglomerátu byly také přidány pelety, které se obvykle používají jako zdroj železa. Pelety byly přidávány za účelem dosažení cílového rozložení po velikosti surovin. Také byl přidán jemný prášek oxidu železitého, aby se zvýšila pevnost za tepla při spékání pevné fáze aglomerátu. Velikost vratného aglomerátu při spékání je více než stokrát menší než u pelet a prášek oxidu železitého je méně než 0,1krát menší než u pelety. Získaný poměr sloučení vratného aglomerátu, pelet a jemného oxidu železitého byl 79 %, 14 % a 7 %. Ultra jemný prášek ze oxidu železitého byl přidán nejen pro zvýšení rychlosti, ale také pro zvýšení pevnosti za tepla při spékání. V případě aglomerátu bez přídavku ultra jemného prášku se pevnost aglomerátů snížila, protože cement a prášek z vysokopecní strusky byly přidány jako pojiva a sloučení cementu se snížilo se zvyšující se teplotou zpracování. Cement a prášek z vysokopecní strusky zde byly přidány jako pojivo z hlediska výrobních nákladů a provozu vysoké pece. Na druhou stranu v případě přidání ultra jemného prášku oxidu železitého byl pokles pevnosti při vyšších teplotách tepelného zpracování přes 600 °C a pevnost se zvyšovala

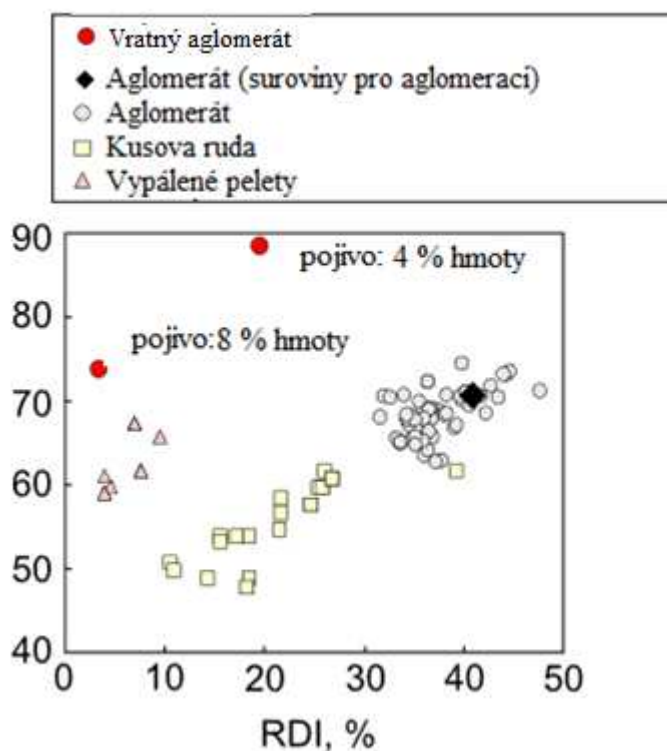
při teplotách nad 800 °C. Toto zlepšení je výsledkem spékání pevné fáze ultra jemným práškem oxidu železitého [16].

Nově vzniklý experimentální vratný aglomerát (dále jen Nový aglomerát) a původní aglomerát byly hodnoceny pomocí JIS-RDI, RI a testu na pevnost v tlaku po redukční zkoušce s ochranou atmosférou CO – CO₂. Složení tohoto aglomerátu je uvedeno v **tabulce č. 9** [16].

Tabulka č. 9 Složení aglomerátů [16]

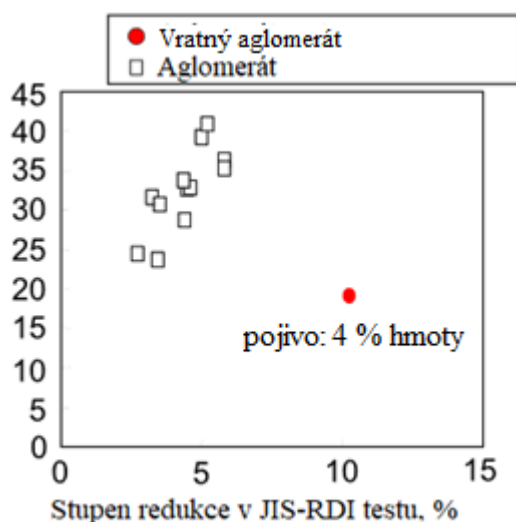
	Jemné rudy	Pelety	Železné oxidy	Cement	VP struska
Složení 1	76.2 %	13.6 %	6.3 %	1.0 %	3.0 %
Složení 2	73.0 %	13.0 %	6.0 %	2.0 %	6.0 %

S cílem snížení výrobních nákladů a snížení množství vzniklé strusky při provozu vysokých pecí, bylo použito 4 % až 8 % strusky a cementu z vysokých pecí a následně byly vyhodnoceny. Poměr redukce byl proto vypočten takto: Za prvé byla změřena redukční hmotnost, když byl plyn N₂ zaveden při stejné teplotě a průtoku jako při zkoušce JIS-RI, a rychlost redukce byla poté vypočtena tak, že se redukční hmotnost odstranila z množství redukované hmotnosti při zkoušce JIS-RI. Výsledky RI a JIS-RDI testu nových aglomerátů jsou uvedeny na **obrázku č. 21** ve srovnání s ostatními surovinami pro vysoké pece. Výsledné suroviny s vratným aglomerátem mají vyšší RI a nižší JIS-RDI ve srovnání s aglomeráty používanými jako surovina pro aglomeraci. Podobná tendence byla pozorována také ve srovnání s ostatními aglomeráty. Vyšší RI a nižší JIS-RDI jsou příznivými podmínkami pro provoz vysokých pecí. [16]

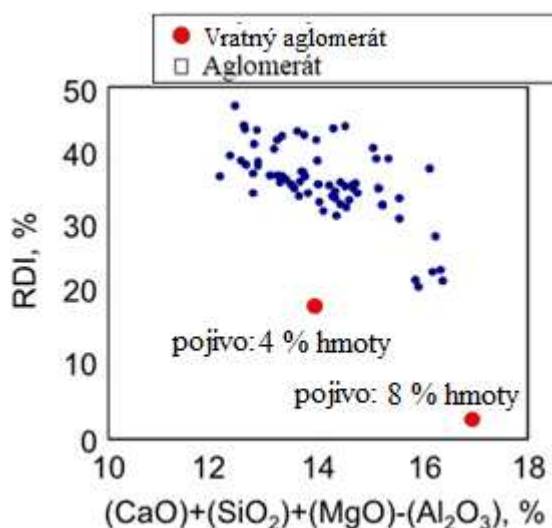


Obrázek č. 21 Porovnání vysokoteplotních vlastností pro vysoké pece [16].

Vztah mezi měřenou hodnotou JIS-RDI a stupněm redukce v testu JIS-RDI je znázorněn na **obrázku č.22**. Hodnota JIS-RDI je úměrná stupni redukce, tedy JIS-RDI je nízký, pokud je redukční schopnost aglomerátu nízká. Na druhé straně je JIS-RDI vratného aglomerátu nižší než JIS klasických aglomerátů, i když je jeho redukční poměr vyšší než u aglomerátů. Jako jeden z faktorů poklesu JIS-RDI vratného aglomerátu lze uvést, že jako surovina byly použity ultra jemné oxidy železa a pelety, které lze při redukci obtížně rozložit. Za předpokladu, že se ultra jemný oxid železitý a pojivo pro pelety při redukci vůbec nerozloží, sníží se JIS-RDI vratného aglomerátu až na 32 % ze 40 % JIS-RDI, protože součet poměru ultra jemného oxidu železitého a vsazených pelet je asi 20 %. Tím hodnota JIS-RDI vratného aglomerátu klesá až na 20 %. Má se za to, že změna struktury vratného aglomerátu pomocí studené aglomerace hraje významnou roli v poklesu JIS-RDI [16].



Obrázek č. 22 Vztah mezi stupněm redukce a RDI v testu JIS-RDI [15]

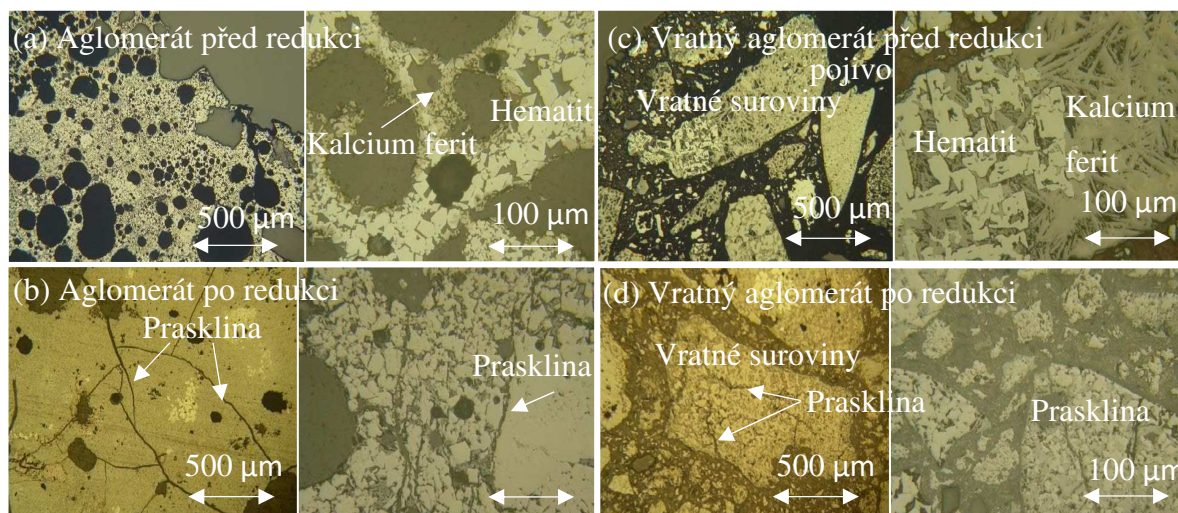


Obrázek č. 23 Vztah mezi složením suroviny a RDI [15]

V rámci studie [16] byl zkoumán vliv složení surovin na JIS-RDI. Je známo, že zvýšení poměru hlušiny snižuje JIS-RDI, protože tyto komponenty snižují redukovatelnost. Je také známo, že průměr pórů v aglomerátu se zvyšuje zvýšením obsahu oxidu hlinitého, protože je sníženo množství tavených materiálů, a navíc, mikropraskliny jsou generovány v zrnech hematitu obsahující oxid hlinitý. A proto RDI se zvyšuje zvýšením obsahu oxidu hlinitého. Na základě těchto poznatků byl zkoumán vztah mezi obsahem v procentech $(CaO) + (SiO_2) + (MgO) - (Al_2O_3)$ a JIS-RDI. Výsledky jsou uvedeny na **obr. 23**. Jak v případě klasického aglomerátu, tak i vratného aglomerátu, se snižuje JIS-RDI zvýšením $(CaO) + (SiO_2) + (MgO) - (Al_2O_3)$ v materiálech a JIS-RDI vratného aglomerátu je nižší než JIS-RDI v klasickém aglomerátu při srovnání se stejným $(CaO) + (SiO_2) + (MgO)$ a (Al_2O_3) . Vzhledem k tomu, že vratný aglomerát byl vyroben pomocí studeného procesu, hlušina funguje jako pojivo, takže má jiný vliv ve srovnání s vlivem v porovnávaném aglomerátem. Při srovnání se stejným množstvím hlušiny je však JIS-RDI u vratného aglomerátu nižší než u klasického aglomerátu [16].

Za účelem prozkoumání mechanismu zlepšení redukční degradace aglomerátů z vratných surovin, byly pozorovány struktury před a po snížení při 550 °C a porovnány se strukturami původního aglomerátu. Redukční zkouška byla provedena po dobu 30 minut při 550 °C se směsným plynem 25 %CO 25 %CO₂ a 50 %N₂, aby se simulovala plynná atmosféra v horní části vysoké pece. Výsledky jsou uvedeny na **obrázku č.24**. V aglomerátu jsou před

redukci pozorovány hlavně hematit, kalcium ferit a praskliny, které vznikají po redukci, jsou rozloženy po celé matrici, která se skládá ze skelného křemičitanu. Naproti tomu ve vratném aglomerátu jsou suroviny před redukcí spojeny pojivem, které má stejnou strukturu jako aglomerát, a v oblasti pojiva vznikají trhliny, které se však následně už nerozšiřují do oblasti pojiva [16].



Obrázek č. 24 Srovnání struktury minerálů [16].

V rámci provedené analýzy šíření trhlin v aglomerátu se ukázalo, že skelná struska po roztavení měla křehkou strukturu a vzdálenost šíření těchto trhlin byla velká. Ačkoli se vratná aglomerát skládá z křehkého sklovitého křemičitanu, odhaduje se, že makrostruktura aglomerátů není křehká, protože suroviny jsou uspořádány dle matrice a jsou spojeny pojivem [16].

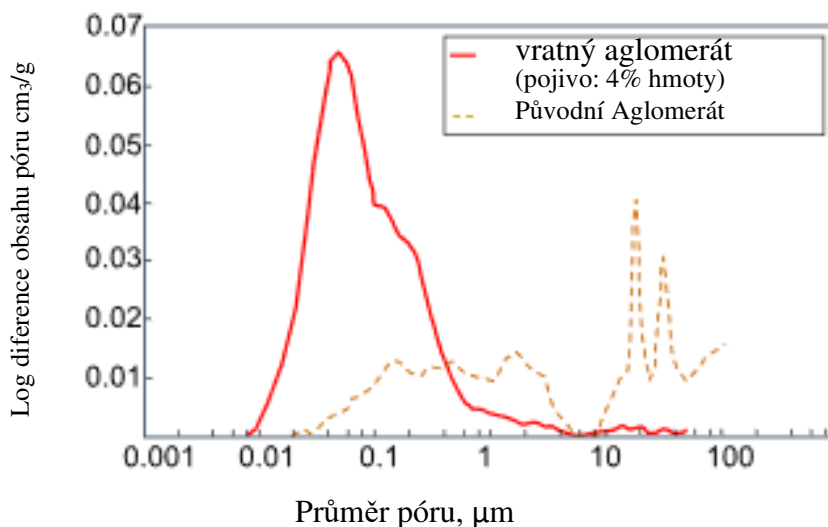
Aby bylo možné vyhodnotit křehkost vratného aglomerátu a zároveň i pojiva v aglomerátech, bylo před zkouškou redukce provedeno vroubkování Vickersovým zkušebním strojem do příčného průřezu. Výsledky jsou uvedeny na **obrázku. 25**. Bylo zjištěno šíření trhlin, které vznikly od odsazení v oblasti surovin, ale v oblasti pojiva nebylo pozorováno žádné šíření trhlin [16].



Obrázek č. 25 Minerální struktura aglomerátů po Vickersově testu tvrdosti [16].

Mimo to, velikost odsazení v oblasti pojiva byla větší než v oblasti materiálu; tedy diagonální délka odsazení v oblasti pořadače byla 99–110 μm , zatímco v oblasti materiálu byla 38–40 μm . Vickersová tvrdost byla vypočtena z diagonální délky odsazení a porovnána s délkou v oblasti materiálu. Vzhledem k tomu, že Vickersova tvrdost pojiva v oblasti pořadače byla 0,15krát vyšší než v oblasti materiálu, byla oblast pojiva výrazně měkkší než oblast materiál. Z těchto experimentálních výsledků vyplývá, že křehký materiál ve vratných aglomerátech je složen převážně ze sklovitého křemičitanu a je spojen měkkým pojivem. V důsledku toho jsou nové aglomeráty méně křehké než původní aglomerát a proto RDI se snižuje, protože se zabráňuje šíření trhlin v tepelné oblasti, kde dochází ke snížení rozpadu [16].

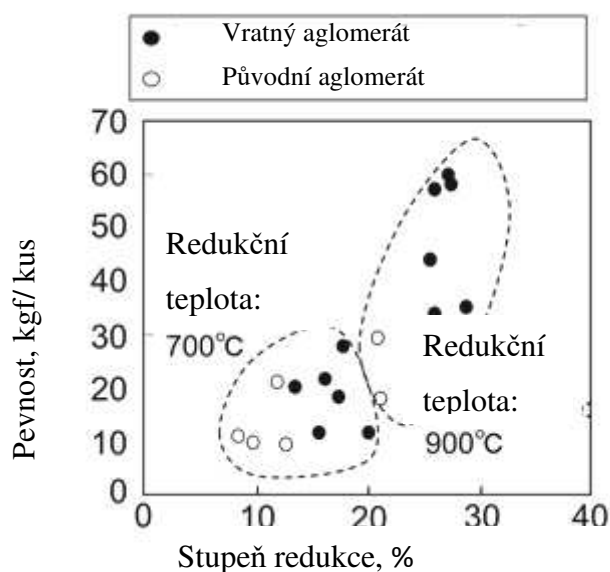
Za účelem prozkoumání důvodu, proč byla RI novém aglomerátu vyšší než RI původního aglomerátů, bylo zkoumáno rozložení průměru pórů. Výsledky jsou uvedeny na **obrázku č.26** [16].



Obrázek č. 26 Distribuce průměru pórů v aglomerátech [16].

Poměr mikro pórů s průměrem pod 15 μm je v novém aglomerátu vyšší než v původním aglomerátu. Byl zkoumán poměr JIS-RI a redukce při 1 000 °C u aglomerátu, železné rudy a pelet. Bylo zjištěno, že JIS-RI a R1000 se zvyšují zvýšením množství mikro pórů o velikosti pod 15 μm, protože redukce pevné fáze je podporována exponenciálním zvýšením plochy. Na základě těchto experimentálních výsledků se má za to, že redukovatelnost novém aglomerátu se zlepšuje nejen použitím jemnější spékací suroviny s velkou specifickou plochou povrchu, ale také vysokým poměrem mikro pórů s průměry pod 15 μm [16].

Také byla zkoumána pevnost v tlaku v novém aglomerátu po redukcí ve srovnání s pevností původního aglomerátu. Redukční podmínky byly složeny redukčním plynem o složení $\text{CO} : \text{CO}_2 : \text{N}_2 = 0,25 : 0,25 : 0,5$, redukční teploty byly nastavené na 700 °C a 900 °C a redukční doba byla nastavená na 30 min. Redukční poměr byl vypočítán z poklesu hmotnosti po redukcí, který byl získán odstraněním poklesu hmotnosti pojiva stejným způsobem jako při měření RI. Výsledky jsou uvedeny na **obrázku 27**. Při srovnání se stejnou redukční teplotou byl redukční poměr v novém aglomerátu vyšší, než redukční poměr původního aglomerátu a kompresivní pevnost novém aglomerátu byla také vyšší, než pevnost původního aglomerátu, zvláště když redukční teplota byla 900°C. Důvodem je skutečnost, že redukční poměr byl zvýšen vyšším poměrem mikro pórů v novém aglomerátu a že se zlepšila pevnost v tlaku po redukcí [16].



Obrázek č. 27 Pevnost aglomerátu po redukční zkoušce [16]

Obsahy celkového železa v aglomerátech závisí na složení směsi a lze je řídit výběrem surovin. Obsahy FeO v aglomerátech se mění v závislosti na množství tuhého paliva ve spékané směsi a rostou se zvýšeným podílem magnetitových koncentrátů. Rovněž nízká bazicita a vysoký obsah MgO přispívají ke zvýšení obsahu FeO v aglomerátu. Obsah FeO je zpravidla přímo úměrný mechanické pevnosti a nepřímo úměrný redukovatelnosti. Při hledání optimálních vlastností aglomerátu se musí přistoupit ke kompromisu a zachovat dostatečnou mechanickou pevnost produktu s vyhovující redukovatelností.

5. Závěr

Předložená bakalářská práce se věnuje možnostem optimalizace procesu spékání železorudných materiálů pro vysokou pec. Analýzou odborných článků a studií, které se věnovaly technologii spékání železných rud, byla nastíněna témata, kterým je v následných kapitolách věnována širší pozornost. Zaměřuje se i na aktuální trendy výroby, jak bude výroba pokračovat po roce 2022, zda nastane pokles ve výrobě oceli a výroby s ním související.

Na tvorbu a množství emisí, které vznikají v aglomeračním procesu má vliv celá řada technologických parametrů. Tvorba plyných a pevných produktů závisí na plynodynamických veličinách, zejména na teplotě, tlaku, vlhkosti množství a zrnitosti paliva, skladbě aglomerační vsázky: množství a druhu zásaditých přísad, množství spékaných druhotných surovin, poměru množství železorudného koncentráту k množství aglorudy a dalším. V aglomeračním procesu je součástí aglomerační vsázky pevné palivo-koksový prach, který je zdrojem uhlíku při spékání železorudných surovin. Snížení zatížení životního prostředí v rámci aglomerace plyným CO je možno ovlivnit rychlostí prosávaného vzduchu, změnou plynodynamických podmínek v průběhu spékání i množstvím a druhem paliva v aglomerační vsázce. Toto se řeší hlavně pomocí různých náhrad paliva biomasou nebo antracitem. Částečná náhrada antracitem je v této době populární a je využívána po celém světě, ale kvůli tomu že antracit není zrovna levný jako náhrada koksu tak se zkoumají i jiné druhy jako je třeba biouhli, které vzniká pyrolýzou různé biomasy. Případně také se zkouší nahrazování přímo dostupnou biomasou jako např. u nás dostupným dřevěným odpadem (piliny).

V další kapitole, zaměřené na analýzu vybraných vlastností železorudných surovin, jsou analyzovány požadované chemické a fyzikální vlastnosti vstupních železorudných surovin do vysoké pece. Z chemických vlastností patří k nejdůležitějším obsah železa, který určuje kvalitu výsledného produktu a dále bazicita, která určuje množství vzniklé strusky jako druhotného produktu ve vysoké peci. Pro každou vstupní surovinu i palivo je dán určitý optimální poměr-rozmezí. To je individuální pro jednotlivá vysokopecní zařízení a závisí na různých faktorech. Dále byly analyzovány fyzikální vlastnosti: pevnost za studena, granulometrie, odolnost proti nárazu, měření/testování těchto veličin a jejich vliv na výslednou kvalitu železorudných surovin vstupujících následně do vysoké pece.

V poslední kapitole jsou popsány vybrané vlastnosti železorudných surovin pro podmínky ČR. Jedná se o metalurgické vlastnosti železorudných surovin a z nich pak byla detailně popsána nejdůležitější vlastnost – redukovatelnost - její stanovení a následné srovnání pro jednotlivé železorudné suroviny.

Literatura

- [1] NOLDIN, J., P. SCHMÖLE a H. LÜNGEN. Trends in Ironmaking Given the New Reality of Iron Ore and Coal Resources. *AISTech Conference Proceedings*, 2-4
- [2] Production and Technology of Iron and Steel in Japan during 2019. *ISIJ International*. **2020**, Vol 60, No 6, pp.1063-1082. Dostupné z: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.60.1063>
- [3] LEGEMZA, J. Advances in Sintering of Iron Oresand Concentrates. *Intechopen*. 2020, **2020**(1), 1-3. Dostupné z: doi:10.5772/intechopen.94051
- [4]. DAVENPORT, W. et al. *Blast furnace ironmaking: Analysis, control and optimization*. 1st ed. Springer, 2019, ISBN 978-0-12-814227-1.
- [5] BABICH, A. *Ironmaking: textbook*. Aachen: RWTH Aachen University, Department of Ferrous Metallurgy, 2008. ISBN 978-3-86130-997-0.
- [6] LEGEMZA J. *Vplyv biomasy na aglomeračný proces a kvalitu životného prostredia [online]*. Košice, 2012 [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://docplayer.sk/194336032-Vplyv-biomasy-na-aglomera%C4%8Dn%C3%BD-proces-a-kvalitu-%C5%BEivotn%C3%A9ho-prostredia-%C4%8D%C3%ADslo-projektu-apvv-doba-rie%C5%A1enia.html>.Projekt. Katedra Metalurgie Železa a Zlievarenstva, HF TU v Košiciach.
- [7] CAVALIERE, P. et al. *Ironmaking and Steelmaking Processes. Greenhouse Emissions, Control, and Reduction*. 1st ed. Springer, 2016. ISBN 978-3-319-39527-2.
- [8] JAHANSHAHI, S. at al. Development of Low-Emission Integrated Steelmaking Process. *Journal of Sustainable Metallurgy*, vol. 1, pp. 94-114, 2015.
- [9] BAGATINI, C. M. et al. Iron Ore Reduction by Biomass Volatiles. *Journal of Sustainable Metallurgy*, vol. 7, pp.215–226, 2021
- [10] ACHARYULU, A. V. B. et al. Thermodynamic and Mineralogical Aspects of Injecting LPG, Coke Oven Gas, and Oxygen into Goethitic Iron Ore Sintering Process. *Journal of Sustainable Metallurgy*, vol. 7, pp.136–150, 2021
- [11] KRET, J. *Teorie procesů při výrobě železa a oceli: část I – Teorie železářských pochodů*. Ostrava, 2013. Studijní opory. VŠB– TU Ostrava.

- [12] FINDORÁK, R. et al. New Utilization of Specific Biomass: Lignin in the Iron Ore Sintering Process. *Metals*. Košice: MDPI, 2020(10), 1-2. doi: <https://doi.org/10.3390/met10091170>
- [13] GAN, M. High Temperature Mineralization Behaviour of Mixtures during Iron Ore Sintering and Optimizing Methods. *ISIJ International*. Čína, 2015(55), 1-3.
- [14] Analýza aglomerace, *Tabulky*, Ostrava, 2019.
- [15] BILÍK, J., PUSTĚJOVSKÁ, P. a S. JURSOVÁ. *Modelování, analýza a predikce pochodů výroby železa z hlediska současných energetických a ekologických požadavků*. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-7204-854-0.
- [16] OGASAWARA, Y. Agglomeration of Return Fines of Sinter for Blast Furnace Raw Materials. *ISIJ International* [online]. 2020(7), 1391-1394 [cit. 2021-4-25]. Dostupné z: doi: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2019-165>

Seznam obrázku

Obrázek č. 1 Srovnání těžby a produkce železné rudy [1]	3
Obrázek č. 2 Produkce koksu pro jednotlivé regiony [1]	4
Obrázek č. 3 Produkce surového železa [2]	6
Obrázek č. 4 Podíly těžby železné rudy [3]	6
Obrázek č. 5 Průřez vysoké pece [7]	7
Obrázek č. 6 Schéma aglomeračního procesu [4]	10
Obrázek č. 7 Termální vyobrazení povrchu aglomerátu po zapálení [3]	11
Obrázek č. 8 Emisní optimalizované spékací zařízení [7]	12
Obrázek č. 9 Koncepční proud pro nízkoemisní proces výroby oceli [8]	15
Obrázek č. 10 Termogravimetrická přeměna rud železa [9]	16
Obrázek č. 11 Termogravimetrická přeměna biomasy [9]	16
Obrázek č. 12 FTIR spektrum biomasy a jejích vzorku získaných při různých teplotách [9].	17
Obrázek č. 13 Hodnoty FeO, Tumblerův index a Indexu redukce u aglomerátu [10]	19
Obrázek č. 14 Koncentrace NO během spékání [4]	19
Obrázek č. 15 Koncentrace SO ₂ během spékání [4]	19
Obrázek č. 16 Rovnováha sil v kapiláře [11]	21
Obrázek č. 17 Princip sbalování zrn [11]	22
Obrázek č. 18 Schéma průběhu spékací směsi [12]	26
Obrázek č. 19 Průřez testovacího zařízení [15]	31
Obrázek č. 20 Vliv distribuce velikosti na pevnost aglomerátů [16].	32
Obrázek č. 21 Porovnání vysokoteplotních vlastností pro vysoké pece [16].	34
Obrázek č. 22 Vztah mezi stupněm redukce a RDI v testu JIS-RDI [15]	35
Obrázek č. 23 Vztah mezi složením suroviny a RDI [15]	35
Obrázek č. 24 Srovnání struktury minerálů [16].	36
Obrázek č. 25 Minerální struktura aglomerátů po Vickersově testu tvrdosti [16].	37
Obrázek č. 26 Distribuce průměru pórů v aglomerátech [16].	38
Obrázek č. 27 Pevnost aglomerátu po redukční zkoušce [16]	39

Seznam tabulek

Tabulka č. 1 Vývojový trend výroby oceli [2]	5
Tabulka č. 2 Porovnání fázového složení jednotlivých vzorků [6]	9
Tabulka č. 3 Konečná analýza surové biomasy a jejich vzorku [9]	18
Tabulka č. 4 Fyzikálně chemické vlastnosti sekacích materiálů [12]	24
Tabulka č. 5 Požadované chemické složení rudných surovin [4].....	26
Tabulka č. 6 Požadované fyzikální vlastnosti rudných surovin [4].....	27
Tabulka č. 7 Seznam jednotlivých druhů materiálu použitých v aglomeraci [14].....	29
Tabulka č. 8 Požadované metalurgické vlastnosti vstupních surovin do vysoké pece [4].....	30
Tabulka č. 9 Složení aglomerátů [16].....	33